

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Analýza tvářecích parametrů zkružování
ocelových trubek**

**Analysis of Roll Bending Parameters for
Steel Tubes**

Student: Bc. Michal Novák

Vedoucí bakalářské práce :prof. Ing. Jiří Hrubý,CSc.

Ostrava 2009

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі, że Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

Plné jméno diplomanta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

NOVÁK, M. *Analýza tvářecích parametrů zkružování ocelových trubek*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB- TU, 2009, 72 s.

Diplomová práce, vedoucí: prof. Ing.Hrubý, J. CSc.

Diplomová práce se zabývá analýzou tvářecích parametrů zkružováním ocelových trubek. Analytické práce byly provedeny na dvou reprezentantech trubek Ø377-16 a Ø406-45 představující tenkostěnný i tlustostěnný profil trubky z uhlíkové oceli 12 040. Ohyby obou reprezentantů byly provedeny pro minimální poloměr ohybu a analyzovány v prostředí programu pro tepelně mechanické zpracování systémem QForm verze 4.3.2. Literární studie obsahuje rozbor používaných technologií, popis hlavních dějů a parametrů při ohýbání trubek.

ANNOTATION OF THESIS

NOVÁK, M. *Analysis of Roll Bending Parameters for Steel Tubes*. Ostrava: Faculty of mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 72 p.

Thesis, director : prof. Ing.Hrubý, J. CSc.

The point of this thesis is an analysis of roll bending parameters for steel tubes. The analysis was simulated on two tubes representants Ø377-16 and Ø406-45 which represent thin-walled and also thick-walled tube profile of carbon steel 12 040. The bend of both representants was performed for a minimal bend radius and was analyzed in software for termomechanical treatment called QForm version 4.3.2. Theoretical part of this thesis includes description of technology analysis, study of principal processes and bending parameters.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

strana

1	Úvod.....	9
2	Rozbor technologií ohýbání ocelových trubek velkých rozměrů	11
2.1	Stručný popis způsobů ohýbání trubek	12
2.2	Hlavní děje probíhající při ohybu trubek.....	17
2.3	Průběh pružných a plastických deformací v ohýbané trubce zastudena a související změny tvaru a napětí.....	19
2.4	Změny tvaru příčného řezu trubky při ohýbání.....	22
2.5	Minimální poloměry ohybu.....	24
2.6	Ohýbání trubek zatepla.....	26
2.7	Hladké ohyby trubek při středofrekvenčním ohřevu.....	28
3	Metody predikce tvářecích parametrů zkružování trubek.....	35
3.1	Metoda stanovení ohybového momentu a tlačné síly	35
3.2	Analytická metoda stanovení tvářecích parametrů při ohybu trubek velkých rozměrů	38
4	Sestavení konstitutivní matice a modelu procesu zkružování.....	44
4.1	Charakteristika materiálového reprezentantu	44
4.2	Model procesu zkružování.....	47
4.3	Akceptované úpravy procesu simulace tepelně mechanického zpracování	50
5	Analýza technologie zkružování trubek pro materiálové reprezentanty	52
7	Seznam použitých zdrojů	62
8	Seznam obrázků	64
9	seznam tabulek	65
10	seznam grafů.....	65

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Použité jednotky
D_r	zmenšení průměru trubky	[mm]
D_p	zvětšení průměru trubky	[mm]
D	vnější průměr trubky	[mm]
d	vnitřní průměr trubky	
R	poloměr ohybu	[mm]
R_v	poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu	[mm]
R_m	poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu	[mm]
t_v	tloušťka stěny na vnější straně ohybu	[mm]
t_m	tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu	[mm]
α	úhel ohybu trubky ve stupních	[°]
r_v	vnější poloměr trubky	[mm]
r_m	vnitřní poloměr trubky	[mm]
r_s	střední poloměr trubky	[mm]
J_s	jmenovitá světlost trubky	[mm]
σ_t	tahové napětí	[MPa]
σ_d	tlakové napětí	[MPa]
σ_{Kt}	napětí na mezi kluzu v tahu	[MPa]
t	tloušťka stěny trubky	[mm]
f_v	obsah plochy mezikruží příčného řezu trubky	[mm ²]
k_t	rozmezí tenkostěnnosti dle autora W.D. Franz	[1]
ρ	poměrný poloměr ohybu	[1]
l_0	původní délka trubky před ohybem	[mm]
Δl	prosté prodloužení krajního vlákna po ohybu	[mm]
R_{nv}	poloměr nezkráceného a neprodlouženého vlákna	[mm]

Symbol	Význam	Použité jednotky
\bar{s}	pruh ohřevu trubky	[mm]
M_o	ohybový moment	[N·m]
S	středu ohybu	[1]
\bar{s}_1	změna šířky ohřátého pruhu trubky na vnějším poloměru ohybu	[mm]
\bar{s}_2	změna šířky ohřátého pruhu trubky na vnitřním poloměru ohybu	[mm]
s_1	Střednice tloušťky stěny trubky na vnějším poloměru ohybu	[mm]
s_2	Střednice tloušťky stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu	[mm]
<i>SOT 530</i>	<i>Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem</i>	[1]
<i>SOT 325</i>	<i>Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem</i>	[1]
W_o	průřezový modul v ohybu	[mm ³]
k_p	napětí na mezi pevnosti při teplotě tváření	[MPa]
k_1	součinitel tvaru	[1]
F_o	zatížení ohýbací kladky vodící kladky; - tlačné zařízení.	[MN]
F_v	zatížení vodící kladky	[MN]
F_t	zatížení tlačného zařízení	[MN]
y	vysunutí ohýbací kladky vzhledem k vodící kladce	[mm]
R_n	nastavený poloměr ohybu pro dosažení požadovaného poloměru R po odpružení	[mm]
D_{ok}	nejmenší průměr ohýbací kladky	[mm]
a_1	vzdálenost induktoru a vodící kladky	[mm]
a_2	vzdálenost ohýbací a vodící kladky	[mm]

Symbol	Význam	Použité jednotky
E	modul pružnosti v tahu materiálu ohýbané trubky	[MPa]
I	moment setrvačnosti ohýbané trubky	[mm ⁴]
σ_p	Přetvárný odpor materiálu trubky	[MPa]
n	exponent zpevnění materiálu	[1]
C	materiálová konstanta pevnosti	[MPa]
e	deformace	[1]
é	rychlost deformace	[s ⁻¹]
So	materiálová konstanta	[MPa]
T	teplota ohřevu trubky v místě ohybu	[°C]
A ₁ ,A ₂ ,A ₃	materiálové konstanty	[1]
m ₁ ,m ₂ ,m ₃	materiálové konstanty	[1]
v	rychlost posuvu tlačného zařízení	[mm.s ⁻¹]
R _{min}	minimální poloměr ohybu trubky	[mm]
L _{min}	minimální délka ramene kladky	[mm]
L	délka ramene kladky	[mm]
r	střední poloměr ohýbané trubky	[mm]
J	moment setrvačnosti	[mm ⁴]
b	relativní šířka průhybu	[mm]
o	ovalita	[%]
O	odchylka ovality	[1]

1 ÚVOD

Značná rozmanitost použití trubek v různých odvětvích průmyslu vyžaduje bohatý sortiment trubek, pokud jde o jejich rozměry a jakost materiálu. Je tedy zřejmé, že trubky jsou velmi důležitým výrobkem. Trubky se používá jednak jako konstrukčního materiálu, jednak jako polotovaru pro výrobu různě tvarovaného potrubí. Trubky jsou v provozu vystaveny mechanickému namáhání vnějšími silami, a to tahem, tlakem, ohybem, smykem, kroucením a jejich kombinacemi, dále namáháním vnitřním, vnějším přetlakem. Přitom mohou být vystaveny tepelnému namáhání, způsobenému rozdílným tepelným stavem v jejich objemu a v různém období jejich používání. K těmto všem vlivům pak přistupují i vlivy chemické. Trubka jako konstrukční materiál je obzvláště výhodná tam, kde je namáhána krutem, poněvadž proti ostatním válcovaným profilům má při stejné váze největší průřezový modul v krutu. I při namáhání ohybem a vzpěrem je trubka velmi výhodným profilem. Trubkové konstrukce jsou lehké. Největší uplatnění trubek je v energetickém, chemickém a v potravinářském průmyslu. Obzvláště v chemickém průmyslu tvoří potrubí rozhodující podíl výrobních zařízení. Také v dopravě trubky zaujímají nemalé místo, a to především v dopravě pneumatické, při které se dopravují s malými nároky na obsluhu sypké materiály kontinuálně potrubím velmi rychle z odlehlých a různě výškově situovaných míst. K nejběžnějším materiálům používaných po výrobu trubek je ocel. Při ohýbání trubek z jiných materiálů lze využít většiny poznatků z ohýbání ocelových trubek.

Z krátkého a pouze přehledového úvodu je zřejmé, že zpracování trubek tvoří důležitou část průmyslové výroby. Tato diplomová práce se nezabývá celým zpracováním trubek, ale sleduje pouze zpracování trubek, a to zkružování trubek velkých rozměrů pro analyzované reprezentanty trubek, které představují tlustostěnné i tenkostěnné profily ohýbaných trubek. Ohýbání trubek na rovinný nebo prostorový tvar je svým

charakterem tvářecí technologie, proto jsou v dalším textu vysvětleny hlavní děje, které při ohybu trubek probíhají.

2 ROZBOR TECHNOLOGIÍ OHÝBÁNÍ OCELOVÝCH TRUBEK VELKÝCH ROZMĚRŮ [1], [2], [3]

Při používání ohýbaných trubek v rozmanitých průmyslových zařízeních se vyskytují nejrůznější požadavky na tvary ohybů. Z hlediska geometrie se jedná zejména:

1. Ohyby ležící v rovině (nejčastěji se vyskytují při vedení potrubí ve volných prostorech)
2. Ohyby ležící v několika rovinách (vyskytující se tam, kde je třeba tvar potrubí přizpůsobit dle možností výrobku, např. stroji, kotli apod.)
3. Ohyby prostorové, u kterých prostorový ohyb zajišťuje technologickou funkci, např. topné spirály či šroubovice.

K výrobě daného geometrického tvaru potrubí je možno využít různých způsobů ohýbání. Volba metody ohybu především závisí na materiálu trubky, na jejím rozměru a na minimálním poloměru ohybu. Mezi faktory ovlivňující použitelnost metody ohybu patří:

- tažnost materiálu (zatepla, zastudena)
- schopnost metody dosáhnout správného geometrického tvaru bez zvlnění na vnitřní straně ohybu.

Jednotlivými metodami procesu ohýbání je možno dosáhnout různých výsledků. Mezi nejnáročnější ohyby patří ty, při kterých je třeba dosáhnout hladkého ohybu spolu s malým poloměrem ohybu.

Během dlouhého vývoje bylo vytvořeno velké množství metod ohýbání, z nichž některé byly vyvinuty pro zcela speciální úkoly.

Výčet všech způsobů ohýbání trubek není ani možné, neboť ohýbání zastudena i zatepla je způsob tváření, při němž má konstruktér ohýbacího stroje mnoho možností. Může využít nejrůznějších kombinací působících momentů a přitlačných sil, například za spolupůsobení osových, tangenciálních sil, a to v tlaku či tahu, kroucení atd., dle potřebného tvaru ohýbané trubky.

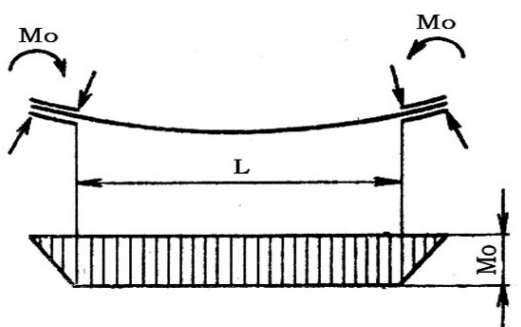
2.1 Stručný popis způsobů ohýbání trubek

Ve většině případů ohýbání trubek je požadováno dosažení stejného poloměru ohybu v celé délce ohybu trubek. Dosažení však stejného poloměru ohybu vyžaduje rovnoměrné působení stejného momentu v celé délce ohybu, či že ohýbání bude probíhat postupně, tzn. síly a momenty budou v průběhu ohybu měnit svá působišťe.

Nejvýhodněji se jeví rozdělení metod ohýbání trubek dle působení momentů a sil v průběhu ohybu, bez ohledu na to zda je ohyb proveden zastudena či zatepla.

- **Ohýbání pouze ohybovým momentem bez spolupůsobení příčných sil působících kolmo k ose ohýbané trubky**

Prosté ohýbání pouze ohybovým momentem je schematicky znázorněno na obrázku 1. Z obrázku je zřejmé, že průběh ohybového momentu je v celé délce ohybu konstantní, a proto by nemělo docházet nerovnoměrnému poloměru ohybu v celé délce ohybu trubky. Tento předpoklad je ale platný pouze v oblasti pružných deformací a po překročení meze kluzu dochází k mnohem složitějším průběhům, kdy se nepříznivě projevuje nehomogenita materiálu a různé odchylky tvaru příčných řezů trubkou.



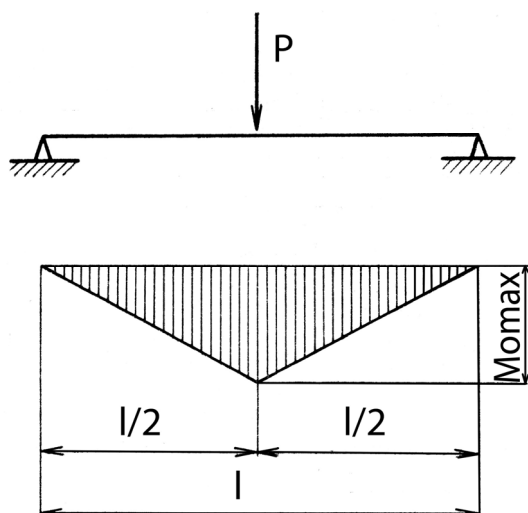
Obr. 1 Ohýbání pouhým momentem.

V procesu ohýbání trubek dochází totiž k vysokému stupni tváření, a to především ve vnějších vláknech ohýbané trubky. Po překročení meze kluzu dochází k různému prodloužení jednotlivých vláken a z tohoto důvodu dochází také k borcení trubek při ohybu. Na borcení trubek se

také podílejí síly, které se snaží průřez trubky zploštit. Zploštěním trubek dochází ke změně profilu ohýbané trubky a tím i ke změně průřezového modulu v ohybu. Z uvedených důvodů není tento způsob ohýbání trubek vhodný a v praxi se ho využívá jen výjimečně. Tento způsob ohybu se hodí pro ohýbání velkých průměrů trubek při velkém poloměru ohybu.

- **Ohýbání momentem vyvolaným příčnými silami**

Tuto metodu ohýbání trubek lze z hlediska průběhu ohybových momentů reprezentovat namáháním nosníku o dvou podporách, zatíženého osamělou silou (obr. 2).

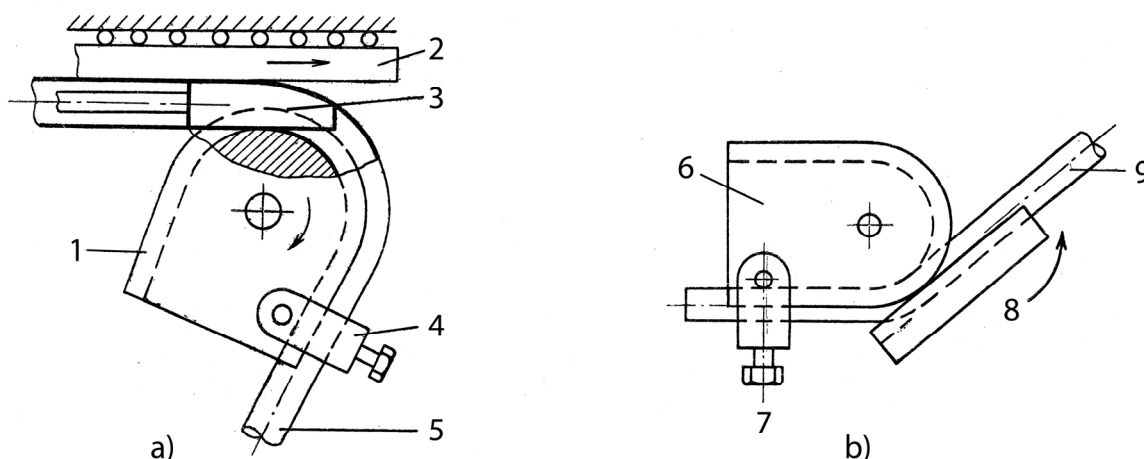


Obr. 2 Ohyb příčnou silou.

Při této metodě ohýbání trubek nedochází k rovnoměrnému rozložení ohybového momentu po celé délce ohybu. Velikost ohybového momentu vzrůstá z nulového zatížení pod oběma podporami do maximální hodnoty pod osamělou ohybovou silou. Působíště sil vzhledem k ohýbané trubce se nemění. Tento způsob ohýbání trubek se využívá pro ohyby vzniklé na lisech, kdy trubka mění tvar dle tvárníku a nakonec se ještě tvárníkem a tvárnicí v příčném řezu kalibruje.

- **Ohýbání navíjením na tvarový segment**

Při tomto způsobu ohybu mění příčné síly kolmé k ose trubky svá působíště. Při ohybu působí ještě osové síly vyvozené třením trnu a přitlačné lišty způsobující přidavný tah. Tato metoda ohybu trubek je jedna z nejpoužívanějších pro ohyby zastudena do úhlu ohybu 180°. Ohýbání navíjením na tvarový segment lze rozdělit na dvě skupiny:



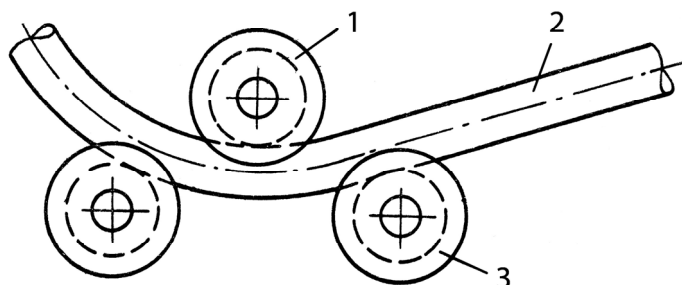
Obr. 3 a) Ohýbání na trnu navíjením na segment.; b) Ohýbání bez trnu navíjením na segment. – 1) otočný segment; 2) lišta; 3) trn; 4) upínka; 5) trubka; 6) pevný segment; 7) upínka; 8) otočná lišta; 9) trubka.

- Ohýbání s opěrným trnem, při němž se otáčí ohýbací segment a na něm upnutá trubka se k němu přitlačuje. Trubka je vyztužena trnem zabraňujícím zploštění (obr.3a).
- Ohýbání bez trnu. Ohýbací segment se nepohybuje a trubka je na něj navíjena a dotlačována za pomoci tvarové lišty nebo tvarovým kotoučem (obr.3b).

- **Ohýbání zakružováním**

Ohybu je docíleno mezi třemi nebo více kotouči (obr. 4). Ohybový moment je vyvozen silami kolmými k ose trubky, které vzhledem k ohýbané trubce mění své působíště. V průběhu ohýbání může být trubka ohýbacími kotouči vtahována, nebo je mezi kotouče vtlačována.

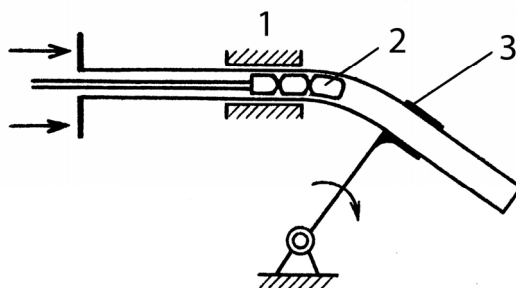
Dle toho pak vznikají různé přídavné síly. Je možno také aplikovat nejen samotný moment ohybový, ale také moment krouticí, který umožňuje ohyby trubek ve šroubovici.



Obr. 4 *Ohýbání zakružováním.* – 1) vnitřní kladka; 2) trubka; 3) vnější kladka.

- **Ohýbání vytlačováním ohýbané trubky**

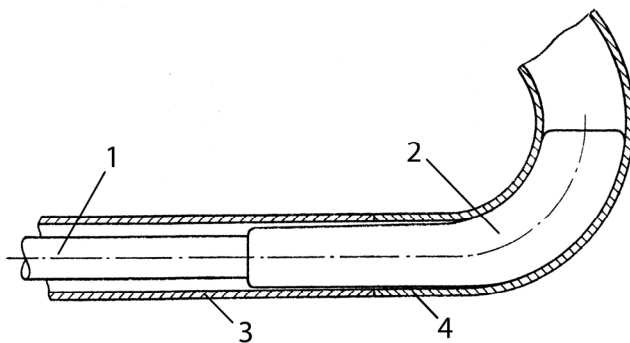
Schéma principu metody je znázorněno na (obr. 5). Ohýbaná trubka je vedena vodítkem, které se otáčí kolem pevného čepu. Příčné síly kolmé k ose trubky vyvozují ohybový moment a za současného působení osové síly (tlaku), která vzniká vytlačováním trubky, vznikají vhodné podmínky pro plastickou deformaci (ohyb trubky). Síly mění vzhledem trubce své působíště a tím zajišťují předpoklad konstantního poloměru ohybu. Osová síla (tlak) je nejčastěji zajištěn hydraulickým zařízením. K zabezpečení proti zploštění a zborcení stěny trubky se používá článkového vyztužujícího trnu.



Obr. 5 *Ohýbání vytlačováním.* – 1) vodítko; 2) trn; 3) upínací čelist.

- **Ohýbání převlékáním přes tvarový trn**

Při tomto způsobu ohýbání trubek je využito převlékání ohýbané trubky přes tvarový trn nejčastěji zatepla (obr. 6). Průběh sil a momentů je velmi složitý, přičemž významnou roli mají síly vyvolané třením o trn. Po provedení ohybu nastává kalibrace v zápustce na lisu.



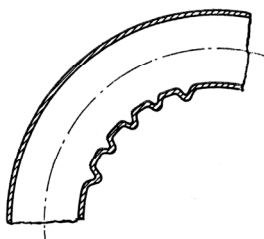
Obr. 6 *Ohýbání vytlačováním.* – 1) trnová tyč; 2) trn; 3 – 4) trubka.

- **Ohýbání vyválnčováním**

Principem této metody ohýbání je vyválnčování určitých částí stěny trubky. Tímto nastává ztenčení stěny trubky a zároveň prodloužení této části. Tímto způsobem je možno dosáhnout ohybů v různých prostorových tvarech.

- **Ohýbání vytvořením záhybů**

Ohybů vytvořených touto metodou ohýbání je dosaženo působením příčných sil. Ohýbání se provádí zásadně zatepla. Na ohřátý výsek stěny trubky působí tlak, při kterém nejdříve vzniká pěchování a následně dochází k vybočení stěny trubky a tím vytvoření záhybu (obr. 7).

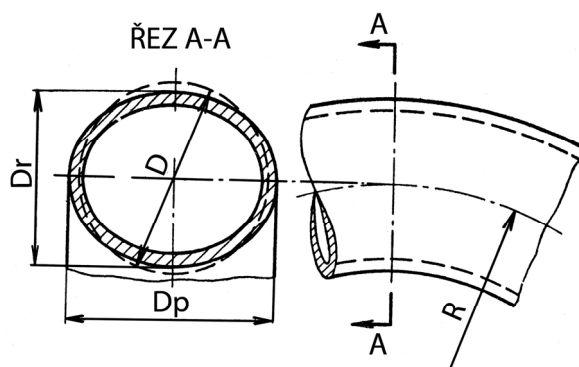


Obr. 7 *Záhybový ohyb.*

2.2 Hlavní děje probíhající při ohybu trubek

Základní pojmy

Příčný průřez ohýbané kruhové trubky se při ohybu mění a může získávat nejrůznější tvary příčných řezů. Nejčastěji se tvar mění ve směru poloměru ohybu, kdy se zmenšuje průměr trubky na hodnotu D_r a naopak ve směru kolmém se průměr v příčném řezu zvětšuje na D_p (viz obrázek 8).

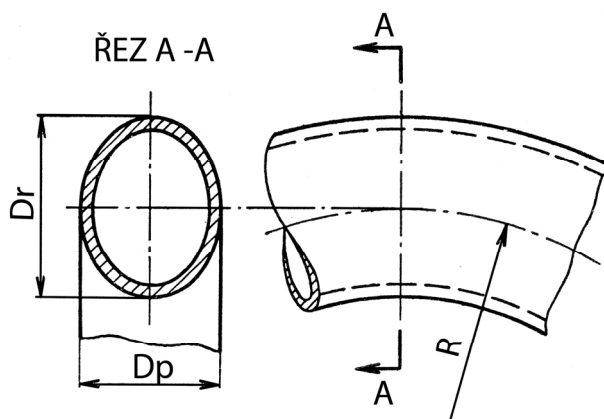


Obr. 8 Zploštělý tvar příčného řezu trubky. $D_r < D_p$

Tímto vzniká zploštění kruhového průřezu, pro které platí:

$$\frac{D_r}{D_p} < 1 \quad (1)$$

Pro tuto nerovnost platí, že tvar příčného řezu trubky bude zploštělý. Pro případ opačné nerovnosti v rovnici (1) nastane vydutý tvar příčného řezu trubky, jak zobrazuje obrázek 9.



Obr. 9 Vydutý tvar příčného řezu trubky. $D_r > D_p$

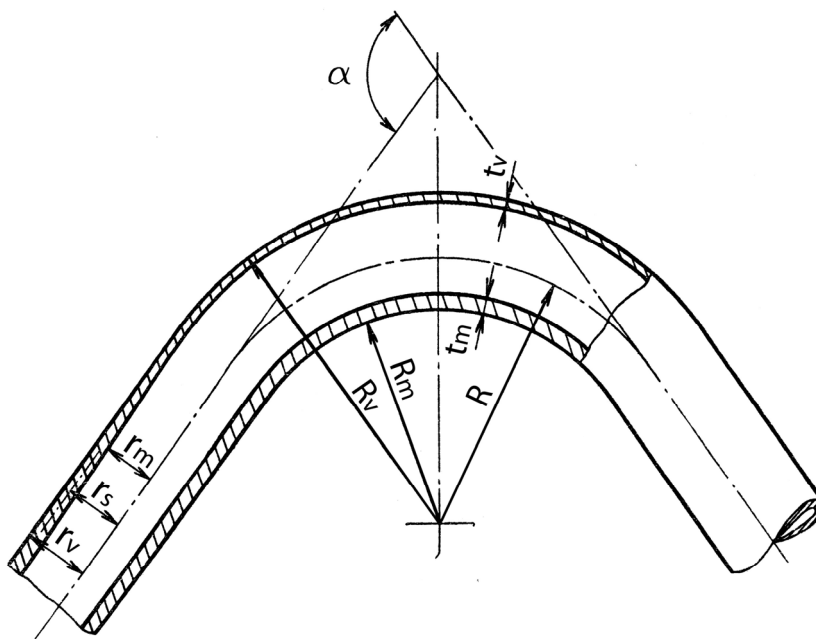
Ovalita příčného řezu trubky může být vyjádřena poměrnou ovalitou, která se vypočte dle vztahu:

$$\sigma = \frac{D_p - D_r}{D} \quad (2)$$

Ovalitu můžeme vyjadřovat v procentech a může nabývat hodnot různých od nuly. Je-li ovalita rovna nule, je příčný průřez ideálně kruhový, neboť čitatel zlomku je roven nule.

Řez ohnutou trubkou:

Trubka po zhotovení ohybu, kdy již nepůsobí síly a momenty, jimiž byl ohyb vyvozen, zaujme trubka tvar, u něhož rozeznáváme základní parametry vyobrazené na obrázku 10.



Obr. 10 Řez ohnutou trubkou.

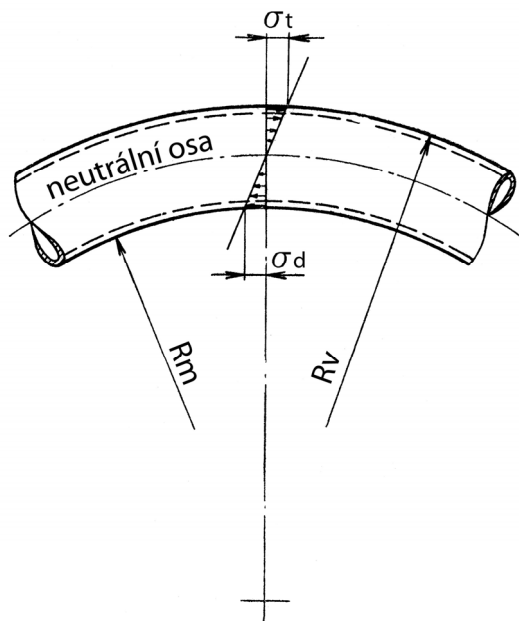
- R- poloměr ohybu
- R_v - poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu
- R_m - poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu
- t_v - tloušťka stěny na vnější straně ohybu
- t_m - tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu
- α - úhel ohybu trubky ve stupních

- r_v - vnější poloměr trubky
 r_s - střední poloměr trubky
 r_m - vnitřní poloměr trubky

Poloměr ohybu R bývá velmi často vyjádřen v násobcích vnějšího průměru trubky. Například $R=3D$, $R=4D$ se používá pro trubky do jmenovité světlosti $J_s=350$, $R=5D$ se používá pro legované ocelové trubky do průměru 350 mm. Malé poloměry ohybu $R=3D$ se volí jen v případech, kdy je to nezbytné a vyžaduje-li si to konstrukce zařízení. V některých případech je ale nutné zhotovit ještě menší poloměry ohybu, které nelze běžnými metodami ohýbání dosáhnout a je nutno použít zvláštní technologie ohýbání.

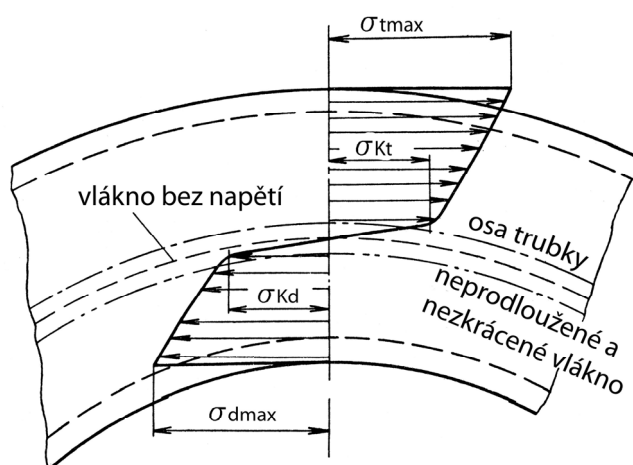
2.3 Průběh pružných a plastických deformací v ohýbané trubce zastudena a související změny tvaru a napětí

Je-li trubka namáhána ohybovým momentem, nejdříve dochází k elastickému ohybu, které je charakteristické lineárním rozložením napětí.



Obr. 11 Rozložení napětí při elastické deformaci v ohýbané trubce.

Neboť neprodloužené a nezkrácené vlákno se Krajiní vlákna na vnější straně poloměru ohybu jsou namáhána maximálním tahovým napětím σ_t a naopak krajní vlákna na vnitřní straně poloměru ohybu jsou namáhána největším tlakovým napětím σ_d . Obě napětí se směrem k neutrální ose snižují a na neutrální ose jsou rovny nule. Neutrální osa při pružném napětí nemění svou polohu ani délku a je totožná s osou ohýbané trubky. Při pokračování ohýbání trubky vzrůstá napětí, které nejdříve v krajních vláknech překročí napětí na mezi kluzu vyvolávající trvalé prodloužení na vnější straně ohybu. Na vnitřní straně ohybu nastává plastické stlačování. Průběh napětí při plastické deformaci stlačováním, prodloužením není lineární, viz obrázek 11. Materiál se na vnější straně ohybu natahuje, zatímco na vnitřní straně se pěchuje. Tímto nastává nerovnoměrné rozložení materiálu v příčném řezu ohnuté trubky. Tloušťka stěny na vnitřním poloměru ohybu roste, na vnější straně ohybu tloušťka stěny klesá. Původní neutrální osa, jejíž napětí při elastickém zatížení bylo rovno nule, přestává být neutrální a zvyšuje se v ní tahové napětí. Teď již tedy přestává být neutrální osou, ale stává se tzv. neprodlouženým a nezkráceným vláknem. Poloha tohoto vlákna se postupně přesouvá směrem ke středu ohybu. Poloha neprodlouženého a nezkráceného vlákna je ovlivněna způsobem ohýbání, zejména působí-li při ohybu kromě sil vyvolávající ohybový moment ještě tahy či tlaky. Ilustrativní rozložení napětí při plastickém ohybu znázorňuje obrázek 12.

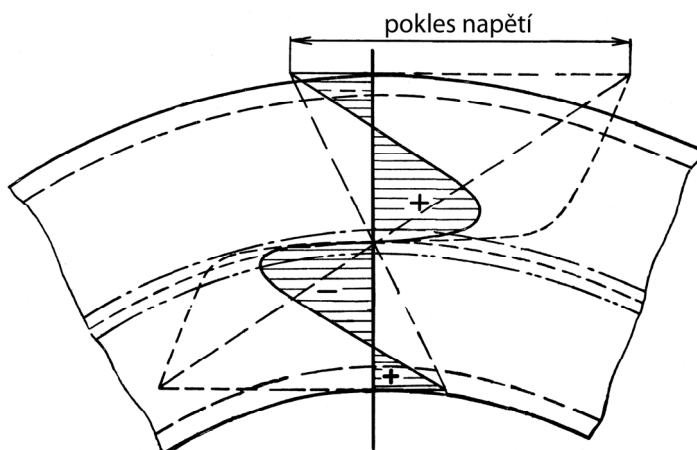


Obr. 12 Rozložení napětí v plasticky deformované trubce při ohýbání.

při plastickém ohybu přemísťuje směrem ke středu křivosti ohybu, je vystaveno tlakovému napětí. Musí tedy ještě existovat vlákno bez napětí, které leží mezi vláknem v ose a vláknem neprodlouženým a nezkráceným.

Je-li trubka uvolněna (po skončení ohýbání) přestane tím působit ohýbací moment, trubka částečně odpruží a vrací se zpět do polohy, kde se vyrovnají momenty vnitřních sil. Po odlehčení se materiál tvářený zastudena vrací analogicky jako při elastických deformacích. Poklesu napětí je úměrné zkrácení trubky na vnější straně ohybu a prodloužení na vnitřní straně ohybu.

Napětí v plasticky deformované trubce je nelineární, ale pokles napětí po odlehčení ohýbané trubky je přibližně lineární (obr. 13). Z obrázku vyplývá, že maximální tahové napětí na vnějším poloměru ohybu po uvolnění přechází vlivem odpružení v tlakové napětí. Jsou to tzv. zbytková napětí. Vnitřní silové momenty vzhledem k vláknulovému napětí jsou však vyrovnány. Po uvolnění trubky po ohybu se trubka částečně napřimuje (tzv. zpětné odpružení).



Obr. 13 Zbytkové napětí v trubce ohýbané zastudena po ohybu po zpětném odpružení.

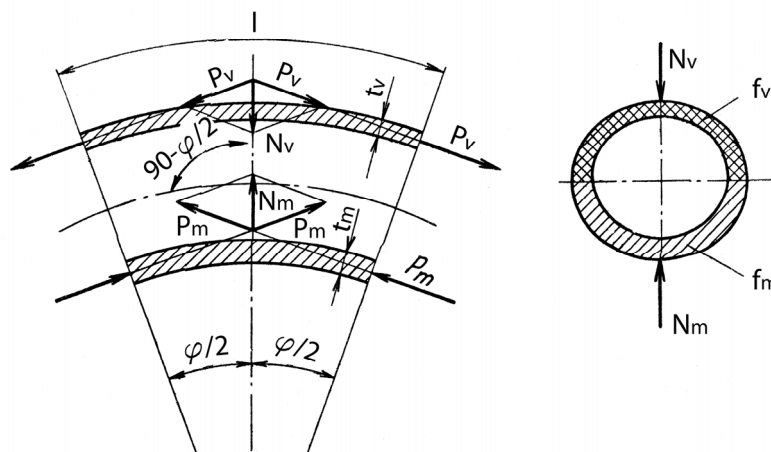
2.4 Změny tvaru příčného řezu trubky při ohýbání

Při ohýbání trubek je v krajních pásmech na vnějším poloměru ohybu maximální tahové napětí a na vnitřním poloměru ohybu maximální tlakové napětí. Normálové síly N_v a N_m se snaží ohýbanou trubku zplošťovat (obr. 14). Z obrázku vyplývá, že pro výpočet normálových sil N_v a N_m na začátku ohybu lze použít vzorec:

$$N_v = 2P_v \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

a po dosazení za P_v :

$$N_v = 2\sigma_{Kt} \cdot f_v \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$



Obr. 14 Rozklad sil v místě ohybu.

za f_v dosadíme:

$$f_v \doteq \frac{1}{2} \left[\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D-2t)^2}{4} \right] \doteq \frac{\pi}{2} \cdot t(D-t) \quad (5)$$

potom:

$$N_v = \pi \sigma_{Kt} \cdot t(D-t) \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

kde: σ_{Kt} - napětí na mezi kluzu v tahu [MPa]

t - Tloušťka stěny trubky [mm]

U tenkostěnných trubek se hodnota $(D-t)$ mění velice málo. Pro zjištění jak působí jednotlivé vlivy na velikost zplošťujících sil N_v a N_m uvažujeme výsek trubky dle obrázku 14. Dle obrázku uvažujeme, že délka oblouku l na vnější straně oblouku je konstantní, a taktéž že počáteční vnější průměr trubky se během ohybu nemění. Analýzou výše uvedeného vzorce zjišťujeme, že velikost normálové síly N_v především závisí na ploše příčného řezu trubkou (f_v) a na hodnotě úhlu ohybu $\sin \frac{\varphi}{2}$. Velikost plošky f_v , popř. f_m při určitém vnějším průměru trubky D závisí na tloušťce stěny trubky (t). Úhel ohybu $\sin \frac{\varphi}{2}$ je při úvaze konstantní délky oblouku l nepřímo úměrný hodnotě poloměru ohybu R . Lze tedy říci, že zplošťující normálové síly N_v a N_m jsou tím větší, čím je hodnota poměru $\frac{R}{D}$ menší, nebo také, čím větší je plocha příčného řezu trubkou f_v (popř. f_m). Plocha příčného řezu trubkou f_v (popř. f_m) vzrůstá takřka přímo úměrně s tloušťkou stěny trubky t , ale odpor proti zploštění vzrůstá s druhou mocninou tloušťky stěny. Z tohoto vyplývá, že vliv sil N_v a N_m na zploštění či zborcení stěny trubky při ohýbání závisí nejvíce na velikosti poměru $\frac{R}{D}$. Při malých hodnotách poměru $\frac{R}{D}$ nastává nebezpečí zploštění či zborcení při ohybu. Zvětšováním tloušťky stěny příznivě ovlivňujeme proces ohýbání a snižujeme náchylnost na tvorbu vln. Trubky tlustostěnné se při ohýbání bortí méně než trubky tenkostěnné. Pro určení jestli je trubka tenkostěnná či tlustostěnná můžeme použít rozmezí tenkostěnnosti dle autora W.D. Franz, který uvádí hodnotu:

$$k_t = \frac{t}{D} \leq 0,06 \Rightarrow \text{tenkostěnná trubka} \quad (7)$$

Minimální poloměr ohybu s ohledem na nebezpečí zborcení stěny trubky tedy závisí zejména na poměru $\frac{R}{D}$ a na zvolené technologii

ohýbání. Zplošťující normálové síly N_v a N_m působí při všech technologiích ohýbání trubek a způsobují deformaci původně kruhového profilu příčného řezu. Deformaci (nejčastěji zploštění) do jisté míry můžeme eliminovat úpravou ohýbacích nástrojů a přípravků, dokonce je možno při ohýbání dosáhnout profilu příčného průřezu vydutého (obr. 9). Deformovaného tvaru jak je zobrazeno na obr. 9, je možno dosáhnout například při ohýbání navíjením na tvarový segment, nemá-li podpěrný trn správnou polohu, nebo při ohybu bez podpěrného trnu, jestliže podpěrná lišta nemá správný tvar. Zachování kruhovitosti trubky po ohybu je důležité. Na dosažení co nejmenší poměrné ovality příčného řezu má vliv mnoho faktorů:

- Odchyšky jakosti materiálu ohýbaných trubek
- Rozměrové odchyšky trubek
- Nastavení nástrojů a přípravků a jejich tvar

S ohledem na mezní úchytky rozměrů vyráběných trubek musí být vyráběny potřebné nástroje a přípravky s patřičnou vůlí, aby nevznikaly potíže při ustavení polohy trubky, nástrojů či přípravků.

2.5 Minimální poloměry ohybu

Různé požadavky z hlediska využití trubek v průmyslových zařízeních ovlivňují volbu provedení poloměru ohybu trubek. Z hlediska proudění kapalin a plynů by bylo výhodné volit co největší poloměry ohybu. Zatímco uspořádání svazků potrubí u různých chemických a energetických nutí konstruktéra využívat poloměrů ohybů pokud možno co nejmenších.

Správné řešení úloh minimálního poloměru ohybu záleží na správném technologickém postupu ohybu, ale i na zkušenostech získaných v praxi. Na základě zkoušek byly sestaveny diagramy pro určité materiály a způsoby ohýbání, ze kterých lze zjistit dosažitelné minimální poloměry ohybu. Neznalost hodnot, získaných zkušenostmi, může vést k závažným finančním ztrátám, neboť se vyrobí nástroje a

přípravky, které nelze v praxi využít. Trubky, u kterých byl zvolen příliš malý poloměr ohybu se při ohybu zvlní nebo praskají.

Poloměr ohybu se nejlépe vyjadřuje poměrným poloměrem ohybu ρ , kde:

$$\rho = \frac{R}{D} [1] \quad (8)$$

Zhotovení malých poloměrů ohybů závisí především na zvolené technologii ohybu. Velice často bývá kritériem pro využití metod ohýbání trubek právě nejmenší dosažitelný poměrný poloměr ohybu. Při překročení minimálního poloměru ohybu vzniká zvlnění na vnitřní straně ohybu.

Minimální poloměr ohybu je ovlivněn:

- použitým materiálem ohýbané trubky
- poměrnou tloušťkou stěny
- použitou technologií ohybu

U materiálů určených pro hyb se vyžaduje jeho vysoká tažnost, neboť vlákna na vnější straně ohybu jsou velmi intenzivně tažena.

Maximální prodloužení vláken na vnější straně ohybu lze stanovit z následující rovnice:

$$\frac{\Delta l + l_0}{l_0} = \frac{R_V}{R_{nv}} \quad (9)$$

kde: l_0 původní délka trubky před ohybem [mm]

$l_0 + \Delta l$ délka krajního vlákna po ohybu [mm]

R_V poloměr krajního vlákna [mm]

R_{nv} poloměr nezkráceného a neprodlouženého vlákna [mm]

V některých případech malých poloměrů ohybů přesahuje tažnost krajních vláken stanovenou hodnotu tažnosti materiálu ohýbané trubky. U kritických případů malých poměrných poloměrů ohybů se navrhuje zjistit tloušťku stěny trubky na vnější straně ohybu. Teoreticky by se měla tloušťka stěny trubky na vnější straně ohybu po ohybu na poloměru R zmenšit z původní hodnoty t na hodnotu t_v , kterou lze stanovit z rovnice:

$$t_v = \frac{t.R}{R + \frac{1}{2}(D-t)} \quad (10)$$

Tloušťka stěny trubky t_v stanovená tímto výpočtovým vztahem neodpovídá zcela přesně skutečnosti. Skutečná tloušťka stěny bývá o 15 až 20% větší, než je výpočtem stanovená hodnota t_v , protože se materiál přemísťuje ve směru tečném a mění se tvar příčného řezu. Při ohybu většinou dochází ke zploštění, což má příznivý vliv na tloušťku stěny.

Na hodnotu poměrného minimálního poloměru ohybu má též vliv poměrná tloušťka stěny trubky. Čím je poměr $\frac{t}{D}$ větší, tím je možno dosáhnout menších poměrných poloměrů ohybů.

2.6 Ohýbání trubek zatepla

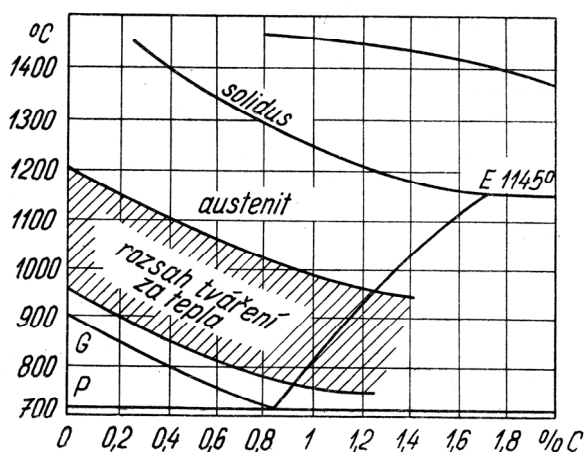
Ohýbání trubek zastudena je pro výrobce z hlediska ekonomické náročnosti nepochybně výhodnější. Také čas nutný pro ohýbání trubek zastudena je obvykle kratší než u ohybů zatepla. Do času nezbytného pro pohyby je nutné započítat i časy přípravné, vyplývající z ohřevu, plnění trubek apod. Režijní náklady při ohýbání trubek zatepla jsou zpravidla vyšší, především z důvodu spotřeby tepelné energie na ohřev.

Ohýbání trubek zatepla se aplikuje především z následujících důvodů:

- Při ohybu trubek z méně houževnatých materiálů zastudena by docházelo k vyčerpání plasticity a materiál by praskal.
- Ke stejným poruchám by docházelo i u materiálů houževnatých při malém poloměru ohybu, dojde-li k překročení tažnosti ohýbaného materiálu trubky.
- Potřeba velkých sil při ohybech zastudena a tím i rozměrných a silně dimenzovaných strojů.

Při ohybech zatepla podstatným způsobem klesá pevnost materiálu a tím také potřebné síly na provedení ohybu. Ohyby lze proto provádět na méně dimenzovaných strojích. Provedení ohybů trubek velkých rozměrů se vyskytuje mnohem méně. Z tohoto důvodu by bylo neekonomické provádět ohyby na drahých strojích zastudena.

Tváření zatepla je charakteristické především tím, že zpevnění materiálu, které v průběhu tváření vždy vzniká, rekrytalizace odstraní. Při tváření oceli zatepla závisí teplota tváření na chemické složení oceli a na obsahu uhlíku. Všeobecně má být ocel tvářena v oblasti austenitu. Maximální teplota ohřevu má být cca 100 - 200°C pod křivkou solidu v diagramu Fe-C. Interval teplot pro tváření zatepla uhlíkových ocelí je znázorněn v diagramu na obrázku 15. Při ohýbání zatepla je nutno dodržovat doporučení příslušných norem materiálů, které předepisují tvářecí teploty. Je velice podstatné, aby teplota při ohýbání zatepla neklesla pod dolní teplotní mez, což u trubek s ohledem na jejich tenkostěnnost je poměrně snadná záležitost.



Obr. 15 Rozsah tvářecích teplot pro uhlíkové oceli.

Volba metody provedení ohybů zatepla je podmíněno především objemem výroby, na rozměrech ohýbané trubky a na požadovaných vlastnostech trubek v provozu.

Ohýbání zatepla je možno rozčlenit na dvě skupiny:

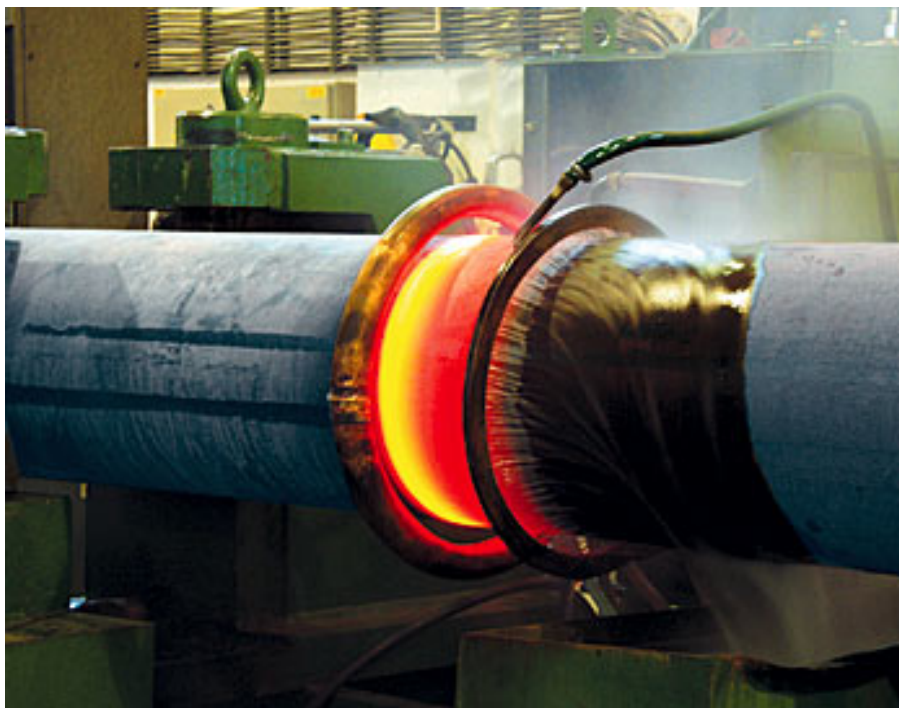
- na hladké ohyby
- na ohyby záhybové

2.7 Hladké ohyby trubek při středofrekvenčním ohřevu

Při ohybech trubek plněných pískem musí být trubka ohřátá po celé délce, ve které má dojít k ohybu. Písková náplň uvnitř trubek tak tvoří výztuž proti zplošťujícím silám. Vlastní ohyb nastává v dosti široké oblasti ve směru osy trubky. Na vnitřní straně ohybu je trubka vystavena tlakovému napětí. Ohřátý materiál trubky má sníženou pevnost a vzniká nebezpečí vybočení stěny trubky a tím ke vzniku zvlnění. K tomuto zvlnění v praxi často dochází, obzvláště pokud je ohýbána tenkostěnná trubka na malý poloměr ohybu.

Ohřátí jen velmi malého pruhu trubky na tvářecí teploty za pomoci indukčního zařízení snižuje nebezpečí vzniku zvlnění po ohybu. Ostatní materiál trubky vyjma úzkého pruhu trubky indukčně ohřátého

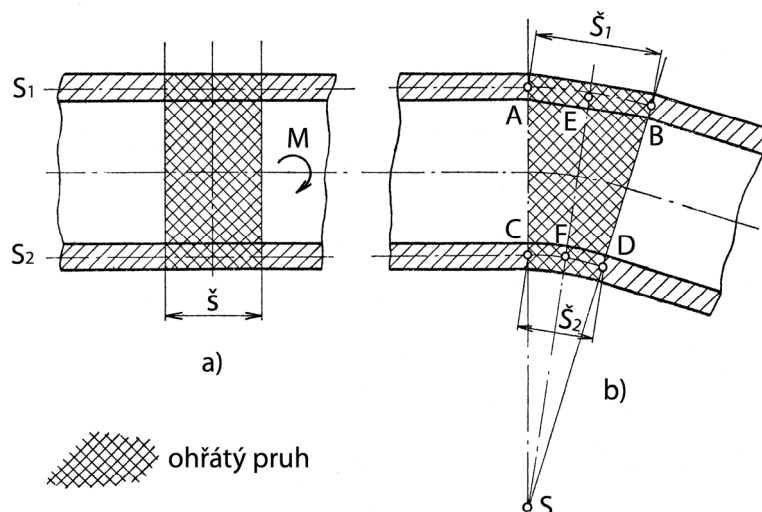
na tvářecí teplotu je chladný a pevný. Tváření tedy probíhá jen ve velmi malém pruhu, přičemž studený materiál před a za tímto pruhem nedovoluje vybočení stěny trubky a tím vzniku zvlnění.



Obr. 16 *Indukční ohřev, ochlazení úzkého pruhu trubky.*

K objasnění průběhu ohýbání a vzniku ovality při středofrekvenčním ohřevu, je nutno objasnit postup tváření při tomto způsobu ohýbání. V místě počátku ohybu je materiál ohříván úzký pruh trubky na tvářecí teplotu (většinou kolem 1050°C). Na obrázku (obr.17a) je pruh ohřevu trubky pro názornost nakreslen širší a označen kótou \bar{s} . V okamžiku, kdy je pruh dostatečně ohřátý na tvářecí teplotu, je uveden v činnost suport s přítlačným válcem, který vyvozuje ohybový moment M a trubku ohýbá kolem středu ohybu S (obr.17b). Ohřátý pruh šířky \bar{s} v důsledku deformace změnil své rozměry. Na vnějším poloměru ohybu je počáteční šířka ohřátého pruhu \bar{s} změněna na \bar{s}_1 , a na vnitřním poloměru ohybu na \bar{s}_2 . Změnou rozměru \bar{s} dojde na vnějším poloměru ohybu ke ztenčení stěny trubky, a naopak na vnitřním poloměru ohybu vlivem přechování k zvětšení tloušťky stěny. Střednice tloušťky stěny s_1 po ohybu spojuje přímočaré body A a B. Střednice s_2 na vnitřním poloměru trubky je vlivem zplošťovacích sil vysunuta směrem k ose trubky. Velikost

vysunutí je především ovlivněna šířkou ohřátého pruhu. Vzdálenost obou střednic v místě EF je tedy menší než v místě AC. Tímto je tedy odůvodněno vznik ovality, která se při tomto způsobu ohybu vyskytuje. Při postupujícím ohýbání se poměry oproti počátku ohybu poněkud změní. Ovalita dosáhne určité stálé hodnoty, která se pak již nemění. Z tohoto vyplývá, že velikost šířky ohřátého pruhu trubky, ve kterém dohází k ohybu, ovlivňuje ovalitu trubky po ohybu, a tedy velikost šířky pruhu s ohledem na ovalitu je vhodné volit pokud možno co nejmenší. Širší pruh způsobuje zvětšení ovality. Šířka ohřátého pruhu je ovlivněna tvarem induktoru a na chlazení oblasti prošlé ohybem.



Obr. 17 Průběh ohýbání při středofrekvenčním ohybu.

Pro tento způsob ohýbání trubek byly vyrobeny speciální stroje určené pro ohyby trubek velkých rozměrů. Například stroj SOT 530, který je určen pro ohyby trubek od průměru 76mm do 530mm, poloměry ohybů (25-60 000) mm a maximální úhel ohybu činí 180°.



Obr.18 Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem SOT 530.

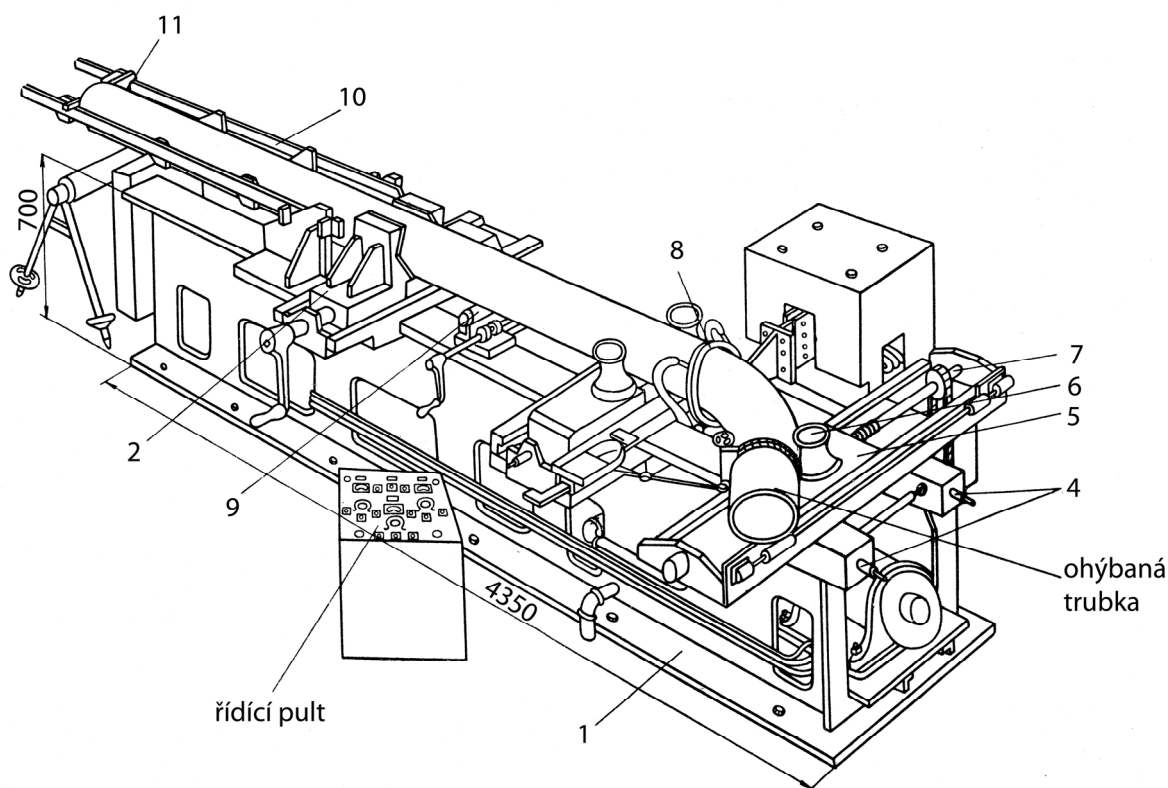
Pro menší průměry ohýbaných trubek je určen stroj SOT 325, který je určen pro ohyby trubek od průměru 108mm do 325mm.

Technická data stroje SOT 325:

Vnější průměr ohýbané trubky min.	108mm,
max.	325mm.
Maximální průřezový modul v ohybu W_o	930cm ³ .
Maximální tloušťka steny pro průměr 325mm	12mm.
Maximální délka ohýbané trubky	4000mm.
Plynule měnitelná rychlost posuvů pro:	
posuvy podélné.	(0,036 až 0,72)m/min.
posuvy příčné.	(0,018 až 0,36)m/min.
Elektromotory pro posuvy	4,2kW.
Plynule měnitelné otáčky elektromotorů	(150-3000) ot/min.

Popis a funkce stroje (obr. 19)

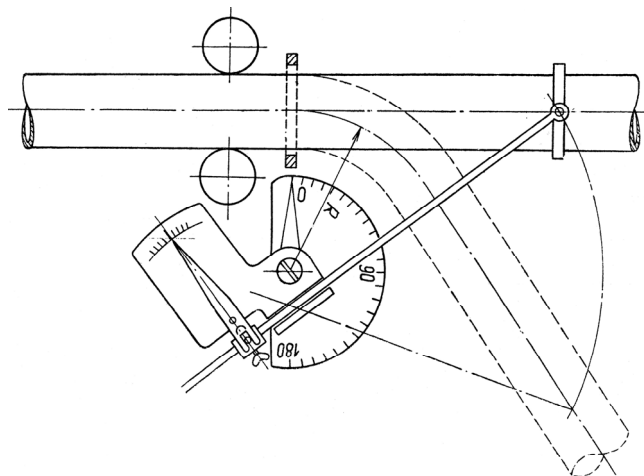
Lože stroje 1 je svařovaná ocelová konstrukce. V loži stroje jsou usazeny pohony pro podélný a příčný posuv. Podélný suport 2 opatřený samostředícím svěrákem pro sevření trubky se může pohybovat po vodících plochách lože. Před tímto suportem je umístěn další suport opatřený vodícími kladkami, který je možno na loži přemísťovat pomocí dvou šroubů 4, které jsou spolu spojeny převodem. Příčný suport 5 má na příčných saních umístěnu ohýbací kladku 6. Příčné sáně jsou poháněny od motoru s plynulou regulací 7 pohybovým šroubem. K loži je dále přimontována konstrukce pro induktor 8, který lze vodorovně i příčně ustavit do správné polohy vzhledem k ohýbané trubce. Podpěrka s válečkem 9 na loži slouží k podepření trubky. Podpěrka je na loži volně přemísitelná. Z řídicího pultu je možno řídit oba posuvové motory a regulaci ohřevu.



Obr.19 Stroj pro ohýbání trubek SOT 325.

Stručný postup práce na stroji

Dle průměru ohýbané trubky se zvolí induktor, který se namontuje do správné polohy. Pro ohřev trubky do průměru 160mm je zapojen jeden generátor, do průměru 225mm se zapojují 2 generátory a od průměru 225mm jsou v provozu 3 generátory o výkonu 100 kVA. Na ohýbané trubce se vyznačí začátek a konec ohybu. Trubka se vloží do svěráku podélného suportu, který je v zadní poloze. Podélný suport 2 je pevně spojen s táhly 10, na kterých jsou dorazy pro příčník 11. Ten je možno umístit na dorazech ve třech různých polohách dle délky ohýbané trubky. Svěrák podélného suportu tedy ohýbanou trubku pouze středí. Podélný suport je poháněn pohybovým šroubem od motoru s plynulou regulací otáček. Vložená trubka je tedy tažena podélným suportem za pomoci příčníků. Prochází mezi vodícími kladkami, které se dle průměru ohýbané trubky seřadí jak podélně, tak příčně. Na suportu je též umístěno měřicí zařízení ke kontrole úhlů a poloměrů ohybu (obr.20).



Obr.20 Měřicí zařízení ke kontrole úhlů a poloměrů ohybů.

Dělník najede podélným suportem s trubkou do induktoru až do místa, kde má začínat ohyb. Dle tabulek nastaví vhodné nastavení kladek a ohřev. Nastaví zarážky dle požadovaného ohybu, měřidlo nastaví do nulové polohy a zapne ohřev. Při dosažení ohřevu trubky cca 700°C

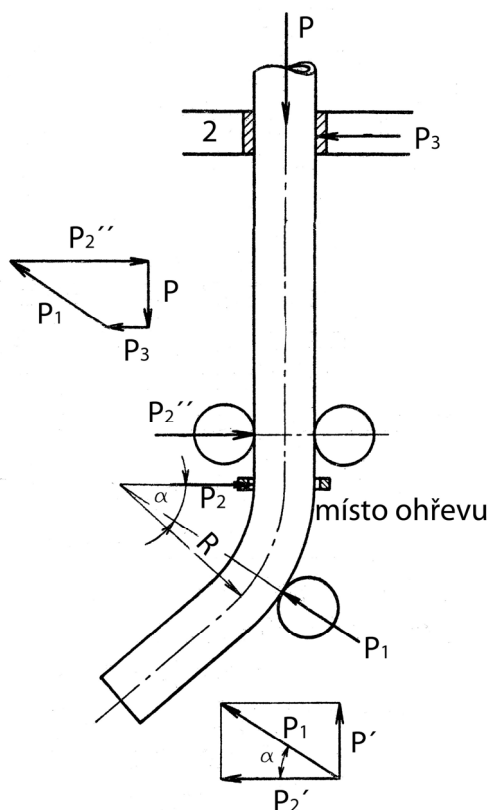
spustí chladicí kapalinu, která tryská z chladicího zařízení na trubku (viz obrázek 16). Zároveň uvede v činnost podélný i příčný posuv. Teplota ohřívaného tenkého pruhu trubky poměrně rychle vystoupí na 1000 až 1050°C. Příčná kladka najíždí na zarážku, na které se saně příčného suportu zastaví. Ohyb pak má již konstantní poloměr. Stroj není opatřen zařízením pro zjištění teploty ohřevu a dělník ji musí vystihnout zrakem. Teplota lze regulovat buď změnou rychlosti podélného posuvu, nebo regulací vlastního ohřevu. Dělník musí též sledovat měřidlo udávající poloměr ohybu a dle potřeby změnit polohu kladky příčného suportu. Po dosažení požadovaného úhlu ohybu vypne ohřev, chlazení a podélný posuv.

3 METODY PREDIKCE TVÁŘECÍCH PARAMETRŮ ZKRUŽOVÁNÍ TRUBEK [1], [4], [5], [6]

Metody předpokladu tvářecích parametrů při ohýbání ocelových trubek vychází nejčastěji z výpočtových vztahů definovaných na řadě podmiňujících zákonitostí, zjednodušení a daných podmínkách ohybu, ale i z praktických zkušeností získaných procesem ohýbání trubek. S nástupem moderní výpočetní techniky dochází k hojnému využití numerické metody FEM (Finite Element Method).

3.1 Metoda stanovení ohybového momentu a tlačné síly

Z hlediska působících sil a momentů je tato metoda ohýbání trubek založena na ohýbání momentem vyvozeným příčnou silou za současného působení tlaku. Síla vzhledem k ohýbané trubce mění své působíště. Rozklad sil působících při ohybu je schematicky znázorněn na obrázku (obr.21).



Obr.21 Průběh sil při ohybu trubky se středofrekvenčním ohřevem.

Trubka je uchycena ve svěráku podélného suportu a tímto suportem přes táhla s příčníky tlačena mezi kladky silou P . Pro následující výklad uvažujeme ustálený ohyb trubky na poloměru R , při kterém již ohýbací kladka zaujala konečnou polohu. Moment potřebný k provedení ohybu trubky je závislý na průřezovém modulu v ohybu W_o , na materiálu a na výši ohřevu ohýbané trubky. Pro ustálené teplotní poměry je hodnota ohybového momentu M pro danou ohýbanou trubku konstantní.

Ohybový moment lze vyjádřit vztahem:

$$M = W_o \cdot k_p \cdot k_1 \quad (11)$$

kde: W_o průřezový modul v ohybu [mm^3]

k_p napětí na mezi pevnosti při teplotě tváření [MPa]

k_1 součinitel tvaru [1]

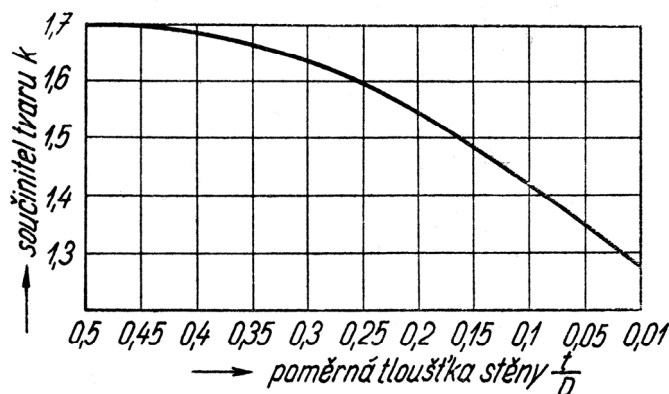
Součinitel tvaru pro trubku k_1 má hodnotu:

$$k_1 = 1,7 \frac{1 - d(\frac{d}{D})^3}{1 - d(\frac{d}{D})^4} \quad (12)$$

kde: d vnitřní průměr trubky [mm]

D vnější průměr trubky [mm]

Součinitel tvaru vyjadřuje poměr momentů vnitřních sil při plastickém a elastickém ohybu za předpokladu stejného napětí v krajních vláknech ohýbané trubky, zanedbá-li se zpevnění materiálu. Součinitel tvaru závisí na profilu příčného řezu. Pro trubky je možno hodnotu odečíst z grafu na obrázku 22.



Obr. 22 Součinitel tvaru pro trubky.

Ohýbací kladka působí na stěnu trubky silou P_1 , která zapříčiňuje vznik ohýbacího momentu na rameni $R \sin \alpha$ (viz obrázek 21).

$$M = P_1 R \sin \alpha \quad (13)$$

Provedeme-li rozklad síly P_1 , ve složky P' a P_2' je zřejmé, že $|P| = |P'|$. Z vektorového obrazce platí:

$$P' = P_1 \sin \alpha \Rightarrow P_1 = \frac{P'}{\sin \alpha} \quad (14)$$

dosazením do rovnice (13) dostáváme:

$$M = \frac{P'}{\sin \alpha} R \sin \alpha = P' R \quad (15)$$

Neboť $M = W_o \cdot k_p \cdot k_1$ je pro určitou tvářecí teplotu konstantní, je i moment $M = P' R$ konstantní. Z rovnosti momentů vnitřních a vnějších sil je možno vypočítat sílu P nezbytnou k protlačení trubky mezi válci.

$$P \cdot R = W_o \cdot k_p \cdot k_1 \quad (16)$$

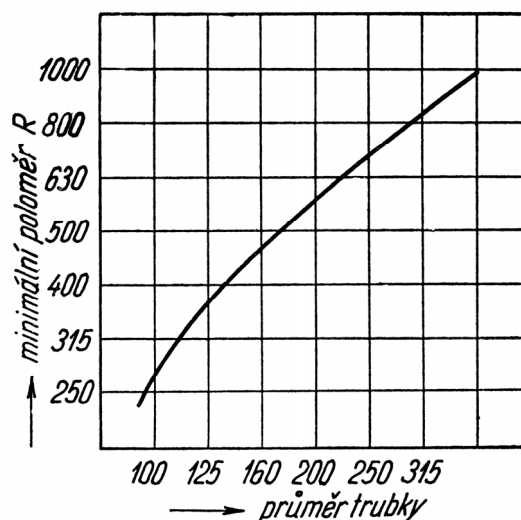
$$P = \frac{W_o \cdot k_p \cdot k_1}{R} \quad (17)$$

Z rovnice je patrné, že síla P je přímo úměrná průřezovému modulu v ohybu, přetvárné pevnosti při určité teplotě a nepřímo úměrná poloměru ohybu. Síla P není závislá na úhlu α .

K posuvové síle je ještě nutno přičíst hodnoty třecích odporů obou kladek a suportu. Tím vzroste posuvová síla asi o 20%.

Na stroji je možno ohýbat trubky z ocelí tříd 10, 11, 12 a 15. Vzhledem k tomu, že za ohřevem následuje ihned sprcha, dochází k zakalení a zvýšení pevnosti materiálu. U uhlíkových ocelí dosahuje

pevnost v místech ohybu přes 980 MPa. Proto je nutno takto ovlivněné trubky do 24 hodin vyžítat. Čas pro zhotovení 90° ohybu je kolem 4 až 13 minut dle vnějšího průměru trubky a tloušťky stěny. Minimální poloměry ohybu dle získaných zkušeností je znázorněno v grafu na obrázku (obr. 23).

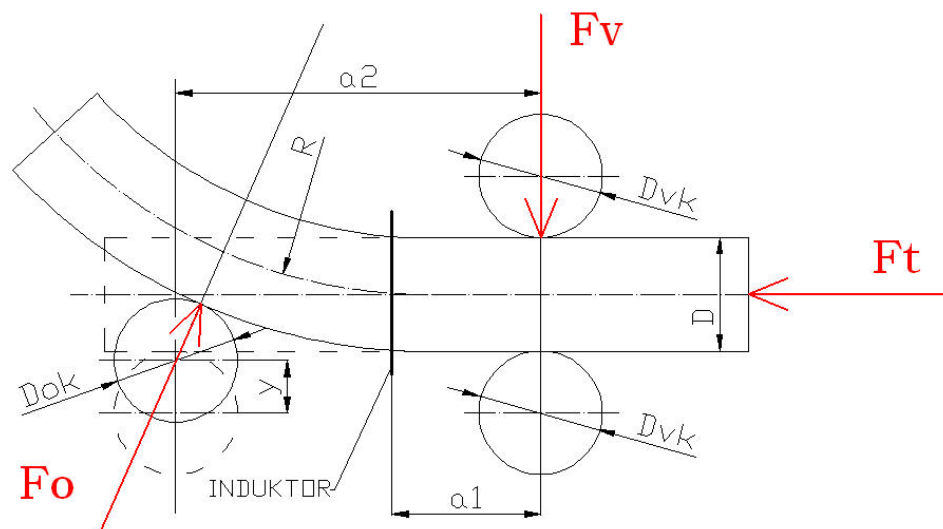


Obr. 23 Minimální poloměry ohybu při středofrekvenčním ohybu.

3.2 Analytická metoda stanovení tvářecích parametrů při ohybu trubek velkých rozměrů.

Analytickou metodu výpočtu můžeme pro účely této práce brát jako kontrolní metodu výpočtu k ověření správnosti hodnot vypočtených metodou MKP. Klasický výpočet používá pretvárný odpor jako konstantu během celého procesu tváření, zatímco výpočet metodou MKP pro materiál a jeho kontakt s okolím zavádí tzv. rozšířenou konstitutivní matici. Klasický výpočet je navíc ochuzen o koeficienty bezpečnosti, v opačném případě by docházelo k předimenzování výpočtu.

Schéma ohýbacího stroje je znázorněno na obrázku 24. Jednotlivé silové reakce působící na kladky ohýbacího stroje jsou označeny F_o - ohýbací kladka; F_v - vodící kladky; F_t - tlačné zařízení.



Obr. 24 Schéma ohýbacího stroje.

Nastavení ohýbací kladky v podélném a příčném směru dle vnějšího průměru ohýbané trubky, požadovaného poloměru ohybu po odpružení, nejmenšího průměru ohýbací kladky lze provést dle vztahu:

$$y = R_n + \frac{D}{2} + \frac{D_{ok}}{2} - \sqrt{\left(R_n + \frac{D}{2} + \frac{D_k}{2}\right)^2 - \left(a_2 - \frac{a_1}{2}\right)^2} \quad (18)$$

kde: yvysunutí ohýbací kladky vzhledem k vodící kladce [mm]

R_n nastavený poloměr ohybu pro dosažení požadovaného poloměru R po odpružení [mm]

Dvnější průměr trubky [mm]

D_{ok} nejmenší průměr ohýbací kladky [mm]

a_1 vzdálenost induktoru a vodící kladky [mm]

a_2 vzdálenost ohýbací a vodící kladky [mm]

Rpoloměr ohybu trubky [mm]

Poloměr nastavení R_n pro dosažení požadovaného poloměru R po odpružení:

$$R_n = \frac{R.E.I}{Mo.R + E.I} \quad (19)$$

kde: Emodul pružnosti v tahu materiálu ohýbané trubky [MPa]

Imoment setrvačnosti ohýbané trubky [mm^4]

M_oohybový moment $[Nm]$

Moment setrvačnosti ohýbané trubky I :

$$I = \frac{\pi \left[D^4 - (D - 2.s)^4 \right]}{64} \quad (20)$$

kde: s tloušťka stěny trubky $[mm]$

Potřebný ohybový moment M_o vychází z rovnice pro plastický ohyb:

$$M_o = \frac{3.\sigma_p.W_o}{2 + n} \quad (21)$$

kde: σ_p Přetvárný odpor materiálu trubky odpovídající teplotě a rychlosti plastické deformace $[MPa]$

W_o průřezový modul v ohybu $[mm^3]$

n exponent zpevnění materiálu, pro tváření zatepla se jeho hodnota blíží nule $[1]$

Průřezový modul v ohybu ohýbané trubky W_o :

$$W_o = \frac{\pi.D^3 \left[1 - \left(\frac{D - 2.s}{D} \right)^4 \right]}{32} \quad (22)$$

Přetvárný odpor materiálu trubky odpovídající teplotě a rychlosti plastické deformace σ_p :

$$\sigma_p = C.e^n \quad (23)$$

kde: C materiálová konstanta pevnosti $[MPa]$

n exponent zpevnění $[1]$

e deformace $[1]$

Pro stanovení deformace e ohýbané trubky lze použít následující vztah:

$$e = \ln \left(\frac{R + \frac{D}{2}}{R} \right) \quad (24)$$

Minimální poloměr ohybu trubky R_{min} [mm]:

$$R \geq R_{min} = 4.k.(D - s) \quad (25)$$

kde: kmateriálový parametr vyhodnocený na základě plastometrického měření [1]

Materiálová konstanta pevnosti C [MPa]:

$$C = So.A_1.\exp(-m_1.T).A_2.A_3.\dot{\epsilon}^{m_3} \quad (26)$$

kde: Somateriálová konstanta [MPa]

Tteplota ohřevu trubky v místě ohybu [°C]

$\dot{\epsilon}$ rychlost deformace [s^{-1}]

A_1, A_2, A_3 materiálové konstanty [1]

m_1, m_2, m_3 materiálové konstanty [1]

materiálové konstanty $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3, k$ a So jsou odvozované na základě vyhodnocení plastometrických měření.

Tabulka č 1. materiálové konstanty $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3, n$ a k pro materiál ocel ČSN 41 2040.

	So	A1	m1	A2	m2	A3	m3	k	n=m2
12 040	143	15,738	0,0028	1,620	0,210	0,727	0,141	1,800	0,210

Rychlost deformace $\dot{\epsilon}$ [s^{-1}]:

$$\dot{\epsilon} = e \frac{v}{R} \quad (27)$$

kde: v.....rychlost posuvu tlačného zařízení [$mm.s^{-1}$]

Velikost veličiny rychlosti posuvu tlačného zařízení je doporučována v závislosti na rozměrech ohýbané trubky.

- Ø377-16 → rychlost posuvu 47 mm.s⁻¹
- Ø406-45 → rychlost posuvu 42 mm.s⁻¹

Minimální délka ramene kladky L_{min} [mm]. Minimální hodnota délky ramene kladky je omezena tuhostí prstence v kontaktu trubky a ohýbací kladky, kde přenáší sílu, která vzniká odporem proti ohybu.

$$L_{min} = \frac{\sigma_p \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}{32 \cdot Fo} \quad (28)$$

kde: dvnitřní průměr trubky [mm]

FoPřítlačná síla ohýbací kladky [MN]

Délka ramene kladky L [mm]:

$$L = a_2 - a_1 \quad (29)$$

Vnitřní průměr trubky d [mm]:

$$d = D - 2 \cdot s \quad (30)$$

Síla působící na tlačné zařízení Ft [MN]:

$$Ft = \frac{Mo}{L \cdot \lg \left[\arcsin \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (31)$$

Přítlačná síla ohýbací kladky Fo [MN]:

$$Fo = \frac{Mo}{L \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (32)$$

Síla působící na vodící kladku F_v [MN]:

$$F_v = \frac{M_o}{L} \quad (33)$$

Výsledná ovalita o [%]:

$$o = \frac{7,45 \cdot r^2 \cdot F_o}{E \cdot J} \cdot 100 \quad (34)$$

kde: r střední poloměr ohýbané trubky [mm]

J moment setrvačnosti prstence [mm⁴]

Střední poloměr ohýbané trubky r [mm]:

$$r = \frac{D - s}{2} \quad (35)$$

Moment setrvačnosti prstence J [mm⁴]

$$J = \frac{b \cdot s^3}{12} \quad (36)$$

kde: b relativní šířka průhybu [mm]

Relativní šířka průhybu b [mm]:

$$b = f(D/s) \cdot D \quad (37)$$

- pro $D/s < 30 \rightarrow b = D$
- pro $30 < D/s < 50 \rightarrow b = 2/3 D$
- pro $D/s > 50 \rightarrow b = 1/2 D$

Pro odchylku ovality O [1] platí vztah:

$$O = \frac{\Delta D}{D} \quad (38)$$

4 SESTAVENÍ KONSTITUTIVNÍ MATICE A MODELU PROCESU ZKRUŽOVÁNÍ [7], [8]

Mechanické a fyzikální vlastnosti tělesa lze vyjádřit maticí, která obsahuje v dohodnutém pořadí číselné hodnoty veličin ve zvolených jednotkách. Mechanické a fyzikální vlastnosti tělesa jsou strukturálně a kvalitativně velice heterogenní a převážně závisí na charakteru procesu, z něhož je materiál vybírán. Při výrobě a konstrukci strojů a zařízení jsou nejpoužívanější smluvní mez pevnosti a kluzu, tažnost, kontrakce, tvrdost, lomová houževnatost, moduly pružnosti, Poissonova konstanta atd. Pro účely výrobních procesů je nutno znát další vlastnosti: matice teplotně závislých veličin souvisejících s procesy tepelného zpracování a konstitutivní matice pro tepelně-mechanické procesy. Někdy jsou tyto matice nahrazeny aproximativními funkcemi:

$$\sigma_p = \sigma_o \cdot A_1 \cdot \exp(-m_1 \cdot T) \cdot A_2 \cdot e^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{e}^{m_3} \quad (43)$$

kde: σ_o materiálová konstanta [MPa]

Tteplota [°C]

edeformace [l]

\dot{e} rychlost deformace [s^{-1}]

A_1, A_2, A_3 materiálové konstanty [l]

m_1, m_2, m_3 materiálové konstanty [l]

4.1 Charakteristika materiálového reprezentantu

Materiálový reprezentant oceli, která byla podrobena analýze ohýbání trubek metodou MKP je ocel dle ČSN 12 040.

- Ocel dle ČSN 41 2040

značka: 12 040

Zařazení do skupiny dle použití: Uhlíková Ocel se zvláštními vlastnostmi, pro zušlechťování a povrchové kalení. Ocel vhodná pro tváření za tepla, v doporučeném teplotním rozmezí 850÷1150°C.

Použití: Velké hřídele stabilních spalovacích motorů, parních strojů a čerpadel, hřídele těžních strojů, transmisní hřídele, sloupy a válce lisů, tvarová tělesa, čepy, kolíky, tlačítka, rozpěrná pouzdra, čelisti, pístnice, ojnice, závěsy pružin, ruční a nožní páky, táhla aj.

Chemické složení:

Tab. 2 Chemické složení materiálu ČSN 41 2040 [hm. %]

C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
0,32 – 0,4	≤ 0,25	≤ 0,3	0,5 – 0,8	≤ 0,3	≤ 0,04	≤ 0,04	0,15 – 0,4

Mechanické vlastnosti:

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu ČSN 41 2040

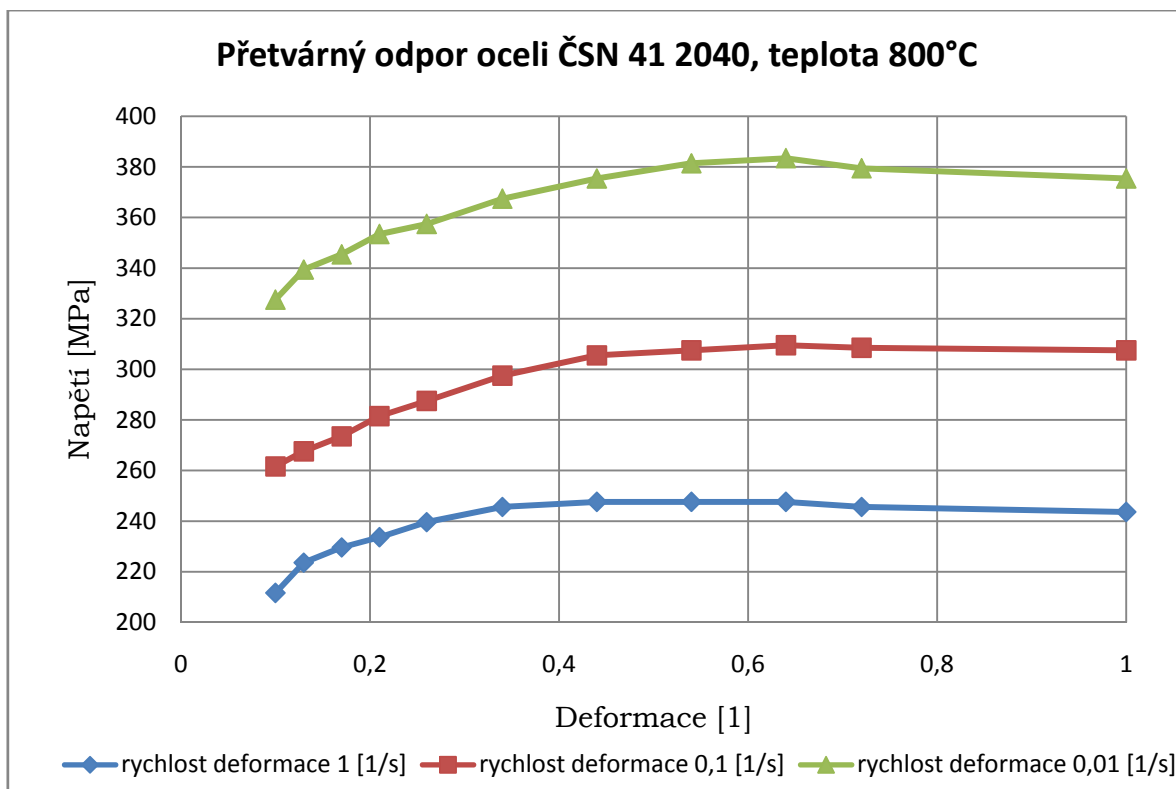
R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	E [GPa]	G [GPa]	HB [1]
≥ 315	≥ 530	≥ 20	206	≥ 79	≤ 183

Tab. 4 Porovnání oceli ČSN 41 2040 se zahraničními ekvivalenty

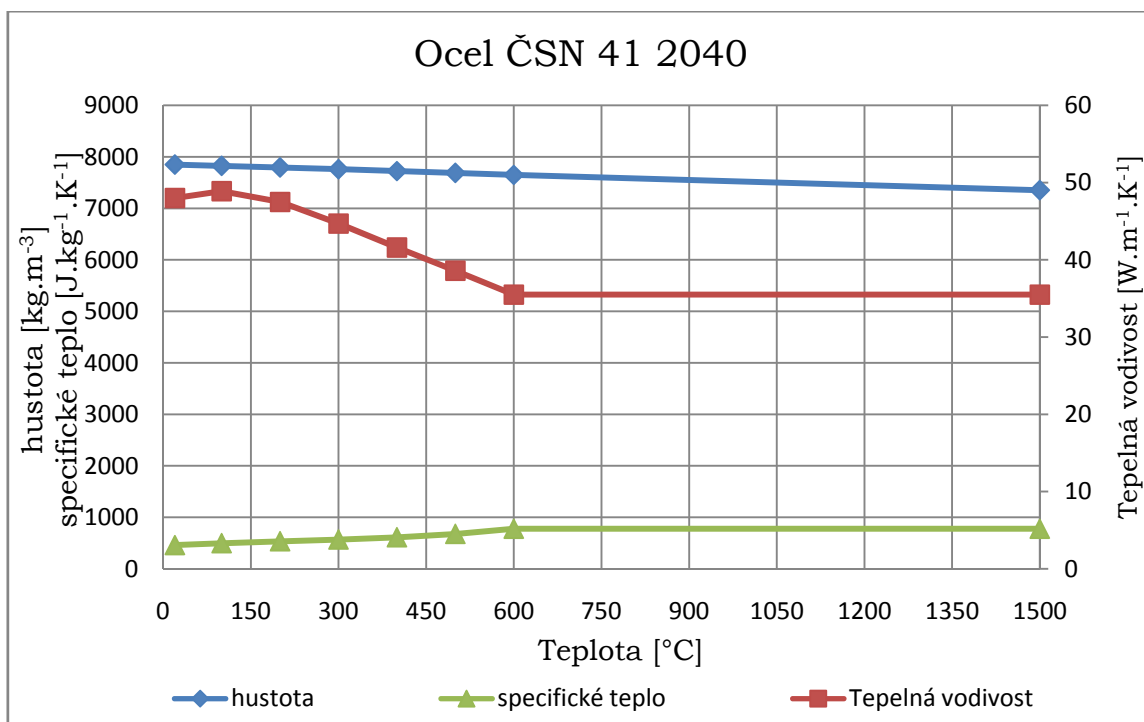
Norma	Značka
EN 10083-2-91	C35
EN 86-70	C36
ISO 683/1-87	C35E4
DIN 17200-87	CK35
GOST 1050-88	35

Materiálový model pro účely analýzy metodou MKP v simulačním programu QForm byl sestaven z konstitutivní matice přetvárných odporů (graf č. 1), a teplotně závislých veličin (graf č. 2).

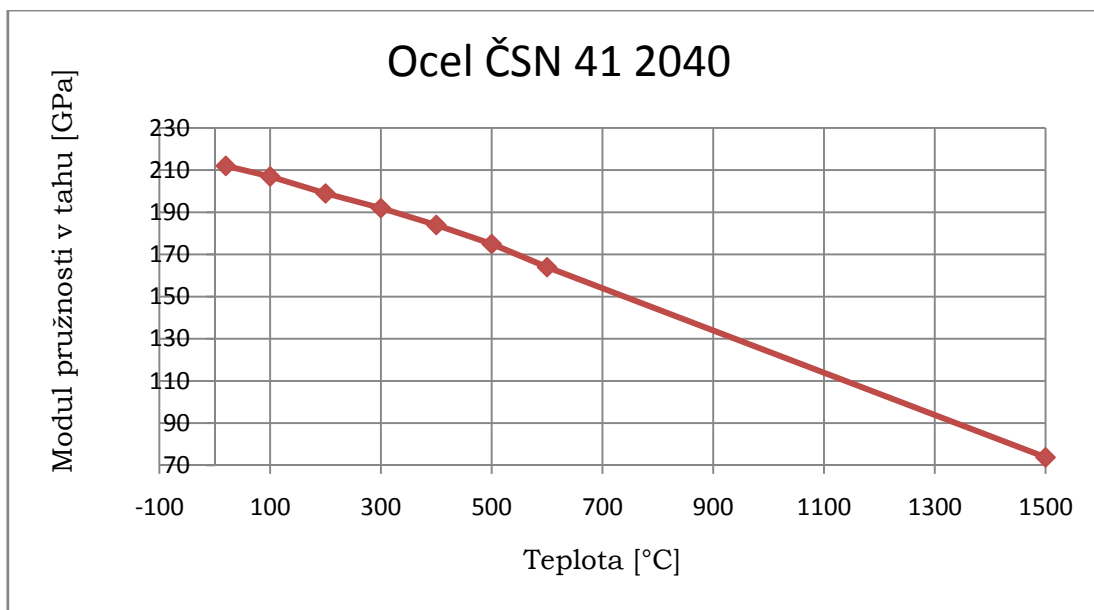
- Poissonova konstanta $\kappa = 0,3$
- Teplota tavení oceli ČSN 41 2040 $T_{TAV} = 1539^{\circ}\text{C}$



Graf č. 1 – Přetvárný odpor oceli ČSN 41 2040



Graf č. 2 – Teplotně závislé parametry oceli ČSN 41 2040

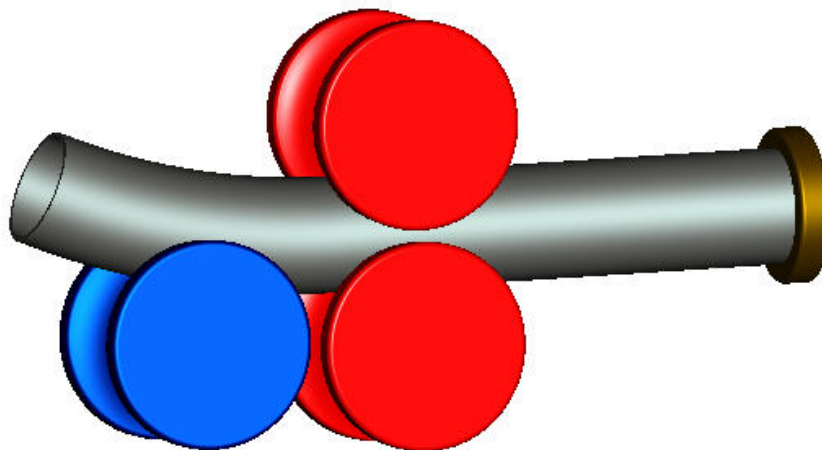


Graf č. 3 – Modul pružnosti v tahu oceli ČSN 41 2040

4.2 Model procesu zkružování

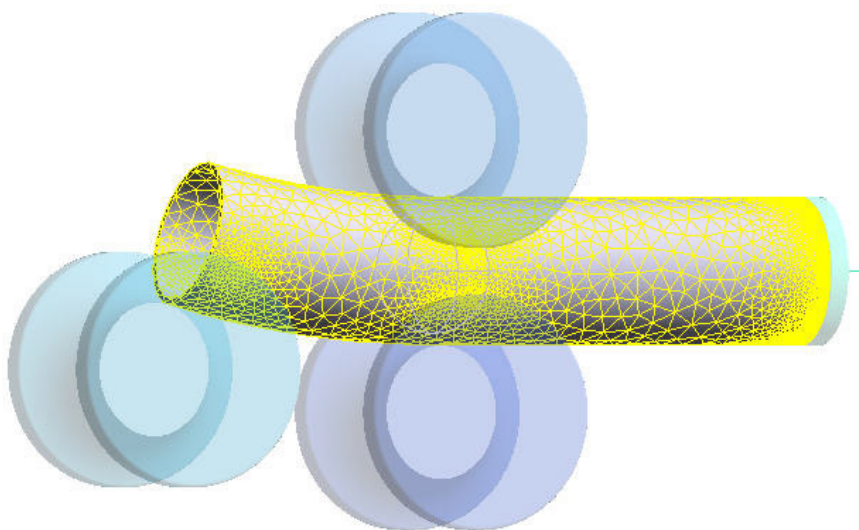
Návrh prostorových modelů obou analyzovaných trubek určených k ohybu zkružováním byl proveden v programu Pro/Engineer, který je určený pro návrhy ve strojírenství. Schéma geometrického modelu je znázorněno na obrázku 29. Vzdálenost os vodících kladek a ohýbací kladky je v podélném směru 800 [mm] a ve směru příčném (vysunutí ohýbací kladky) 109 [mm]. Jako modely ohýbaných trubek, které byly podrobeny analýze, jsou použiti následující reprezentanti:

- trubka Ø 377 – 16, materiál ČSN 41 2040, $R_{\min} = 2500$ [mm]
- trubka Ø 406 – 45, materiál ČSN 41 2040, $R_{\min} = 2600$ [mm]



Obr. 25 *Schéma sestavy geometrického modelu procesu zkružování.*

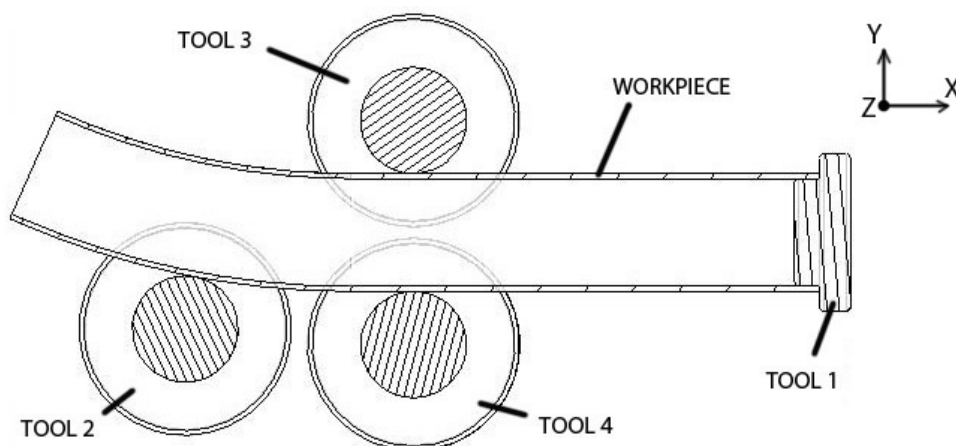
Navržené modely byly exportovány z prostoru modelovacího programu ve formátu STEP (Standard for the Exchange of Product model data), který je podporovaný simulačním programem pro tepelně mechanické zpracování QForm pracující na bázi MKP. Na obrázku 30 je znázorněna celá sestava modelu před započítím simulace zkružování. Pro názornost je zobrazeno síťování ohýbané trubky na konečný počet elementů.



Obr. 26 *Schéma sestavy geometrického modelu procesu zkružování před započítím simulace.*

Před započítím simulace procesu zkružování jen nutno určit specifikace nástrojů a vstupní data ovlivňující samotný proces ohybu. Jedná se především o teplotu okolí, teploty nástrojů, teplotu polotovaru,

použitá maziva aj. Specifikace nástrojů a polotovaru, která bude použita pro následující výklad je patrna z obrázku 31.



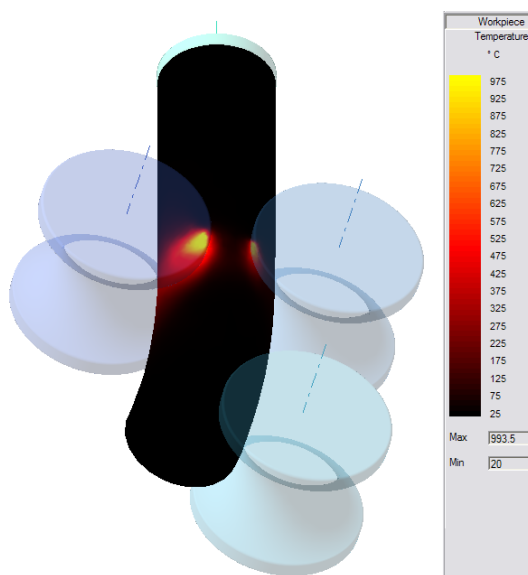
Obr. 27 Specifikace nástrojů a polotovaru v procesu simulace.

- TOOL 1: Tlačné zařízení
 - teplota nástroje: 20°C
 - třecí faktor: 1 [1]
- TOOL 2: Ohýbací kladka
 - teplota nástroje: 20°C
 - třecí faktor: 1 [1]
- TOOL 3, TOOL 4: Vodící kladky
 - teplota nástrojů: 1200°C
 - třecí faktor: 1 [1]
- WORKPIECE: polotovar
 - teplota před započítím simulace: 650°C
 - materiál: ČSN 41 2040
 - teplota okolního prostředí: 20°C

4.3 Akceptované úpravy procesu simulace tepelně mechanického zpracování

Úpravy sestavy geometrického modelu zkružování a simulačního procesu vychází ze snahy snížit výpočtový čas a do jisté míry i z omezených možností simulačního programu QForm. Modifikace přijaté pro simulační proces oproti reálnému procesu ohýbání by neměli zásadně ovlivnit výsledky analýzy procesu zkružování. Jedná se o následující úpravy:

- Výpočetní program QForm verze 4.3.2 neobsahuje modul pro indukční ohřev materiálu polotovaru. Z tohoto důvodu byla snaha indukční ohřev nahradit ohřevem přes vodící kladky, které měly pro potřeby simulace stálou teplotu 1000°C. Ohřevem materiálu trubky přes vodící kladky však docházelo jen k lokálnímu ohřevu na tvářecí teploty a tudíž nedocházelo k požadovanému rovnoměrnému ohřevu materiálu v místě ohybu (obrázek 32). Z tohoto důvodu byla provedena úprava předeřevem materiálu ohýbané trubky na teplotu 650°C před započítím simulace. Dále se zvýšila teplota ohřívacích (vodících) kladek na teploty 1200°C. Tato úprava odstranila výše zmíněný nedostatek a materiál v místě ohybu dosahuje vhodného rozložení teploty.



Obr. 28 *Nahrazení induktoru ohřívacími vodícími kladkami.*

- Z důvodu snížení výpočtového času došlo k před-ohnutí polotovaru trubky tak, aby docházelo ke styku mezi trubkou a ohýbací kladkou. V opačném případě by docházelo ke značnému zvýšení výpočetního času.
- Ze stejného důvodu snížení náročnosti na výpočtové zařízení byl proveden ohyb trubky jen pro malý úhel. Ohýbáním trubky o 90° nedochází k rozdílnému silovému účinku působícímu na kladky ani k rozdílným hodnotám ovality a výpočetní doba se významně zkrátí.

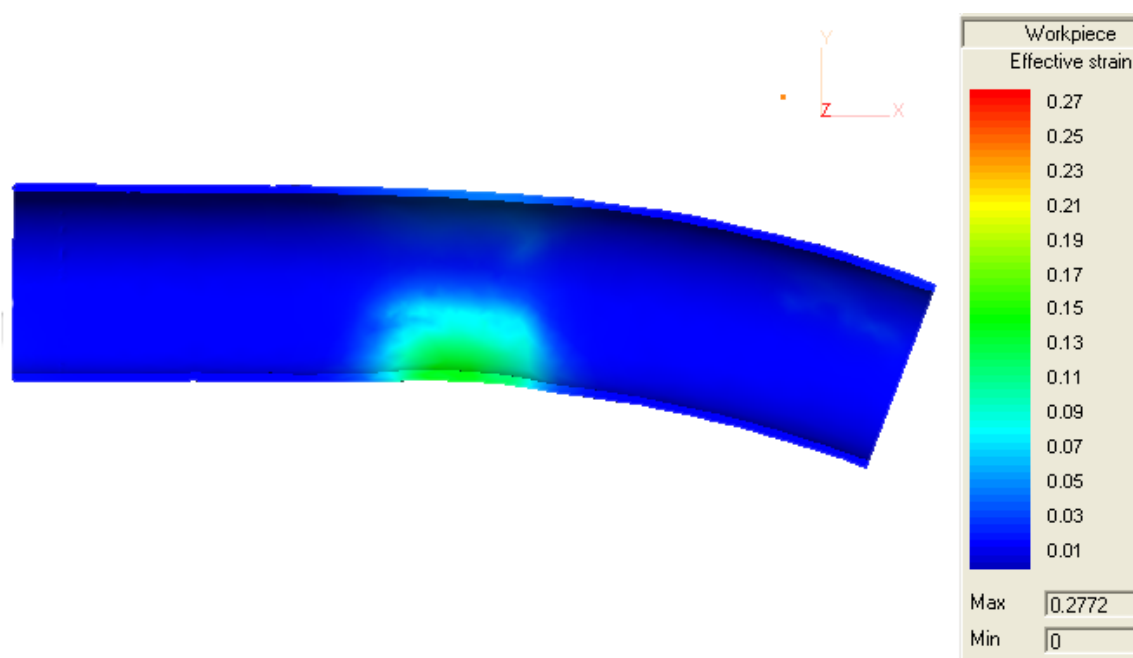
5 ANALÝZA TECHNOLOGIE ZKRUŽOVÁNÍ TRUBEK PRO MATERIÁLOVÉ REPREZENTANTY [4]

Cílem analýzy je specifikovat silové účinky působící na kladky a tlačné zařízení ohýbacího stroje při ohybu dvou rozdílných reprezentantů trubek. Ohýbací zařízení je koncipováno jako tlačné s ohýbací kladkou. Trubka je tlačena soustavou vodících kladek přes indukční ohřívací zařízení proti ohýbací kladce. Analýza byla provedena výpočtovým programem pro tepelně mechanickou simulaci na bázi konečných prvků systémem QForm verze 4.3.2 od firmy Quantor Ltd. Moskva.

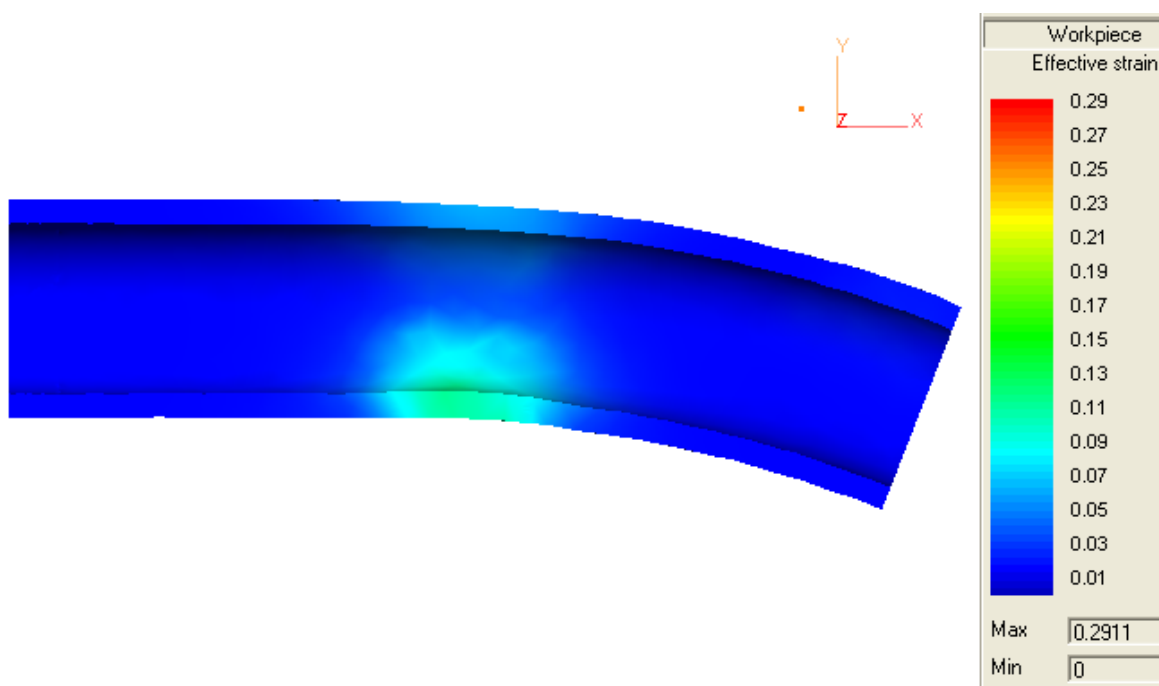
Analyzované materiály:

- trubka Ø 377 – 16, materiál ČSN 41 2040
- trubka Ø 406 – 45, materiál ČSN 41 2040

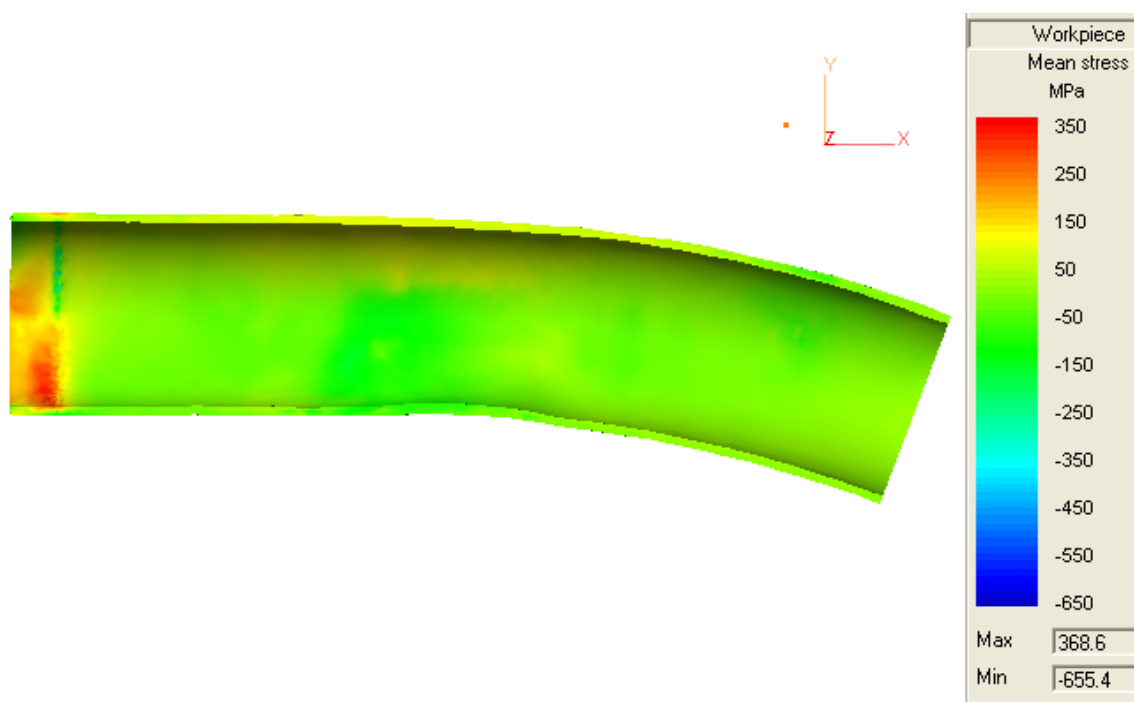
Analýza MKP v programu QForm byla provedena na modelu dle obrázku 29. Analýzou byly pořízeny obrazové výstupy rozložení hlavních veličin: efektivní deformace, střední (hydrostatické) napětí a přetvárný odpor. Tyto obrazové výstupy jsou provedeny pro celou délku ohýbaného polotovaru. Rozložení všech tří veličin dokládá jejich očekávaný vývoj za tepla. Střední hodnota deformace pro analyzovanou trubku Ø 377 – 16 dosahuje hodnoty $\varepsilon \sim 0,14$ [1] a pro trubku Ø 406 – 45 hodnoty $\varepsilon \sim 0,11$ [1]. Rozmístění tahových a tlakových napětí je znázorněno na obrázku 35 a 36 pro oba posuzované modely. Rozložení přetvárného odporu je znázorněno na obrázku 37a 38.



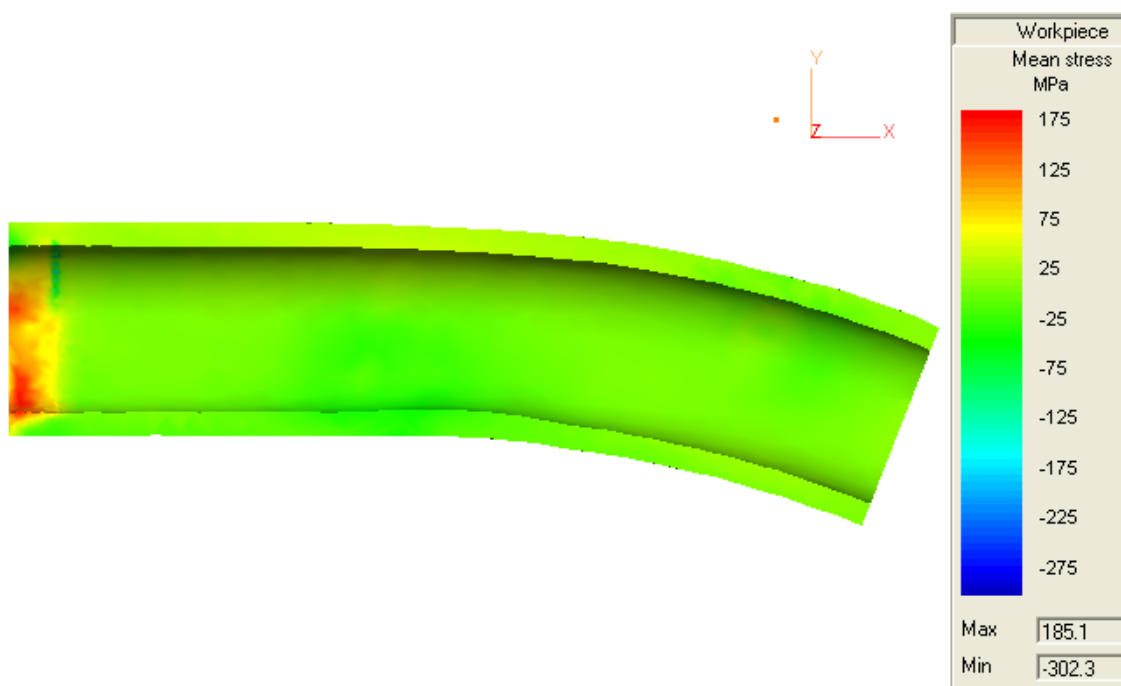
Obr. 29 Efektivní deformace ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.



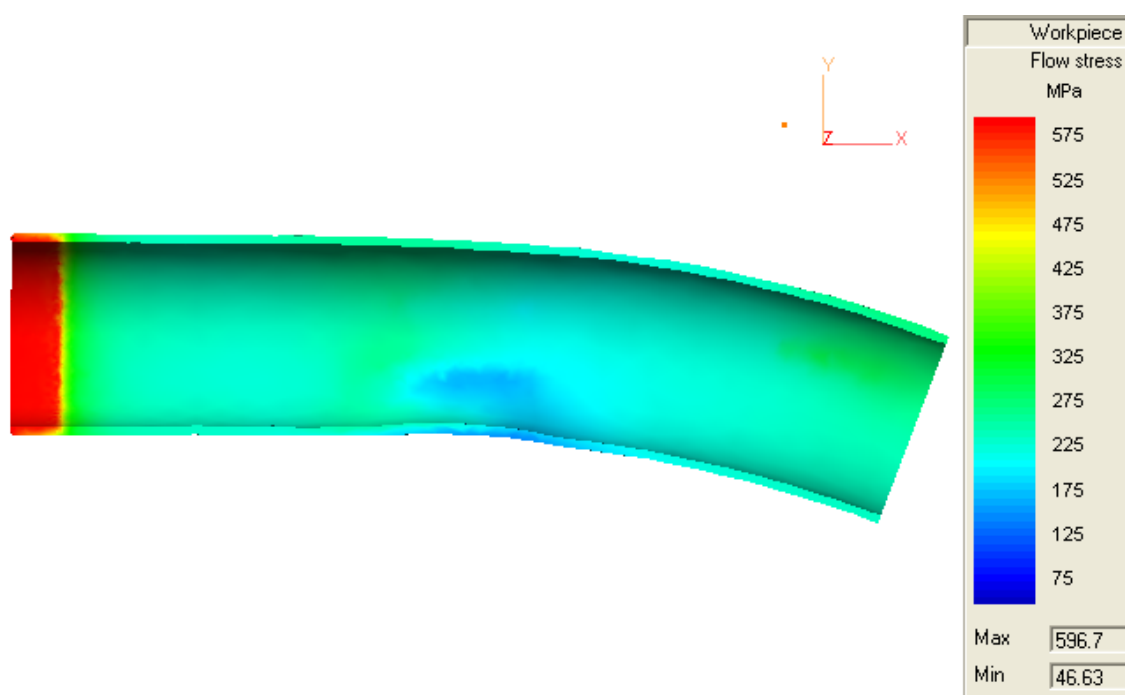
Obr. 30 Efektivní deformace ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.



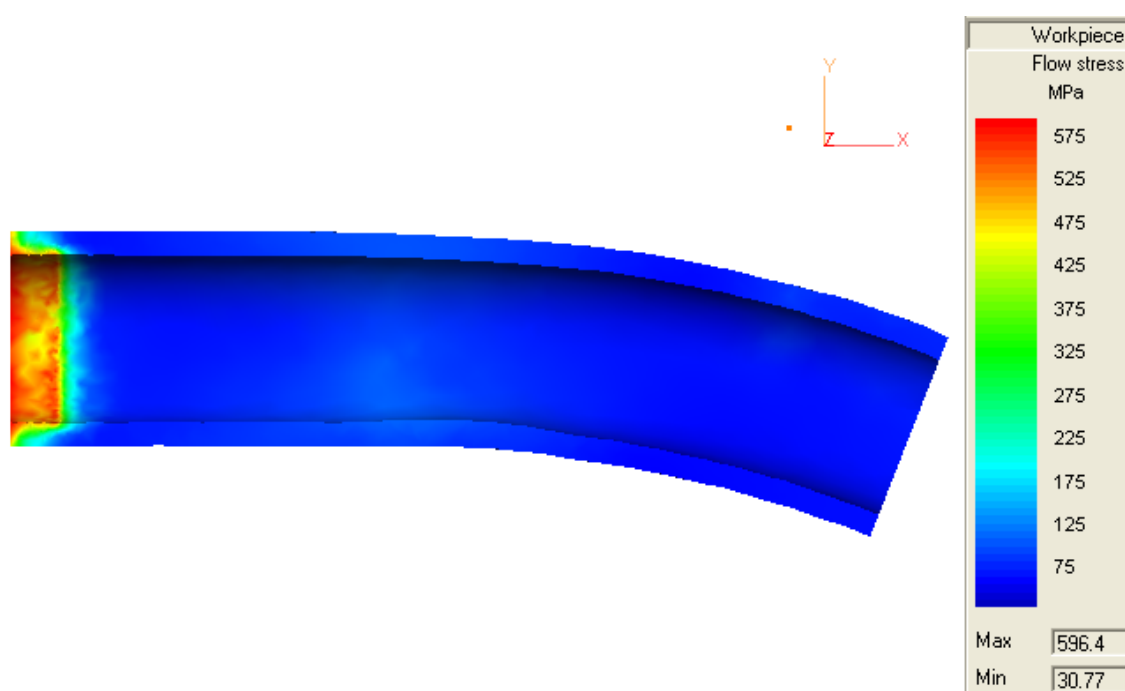
Obr. 31 Střední napětí ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.



Obr. 32 Střední napětí ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.

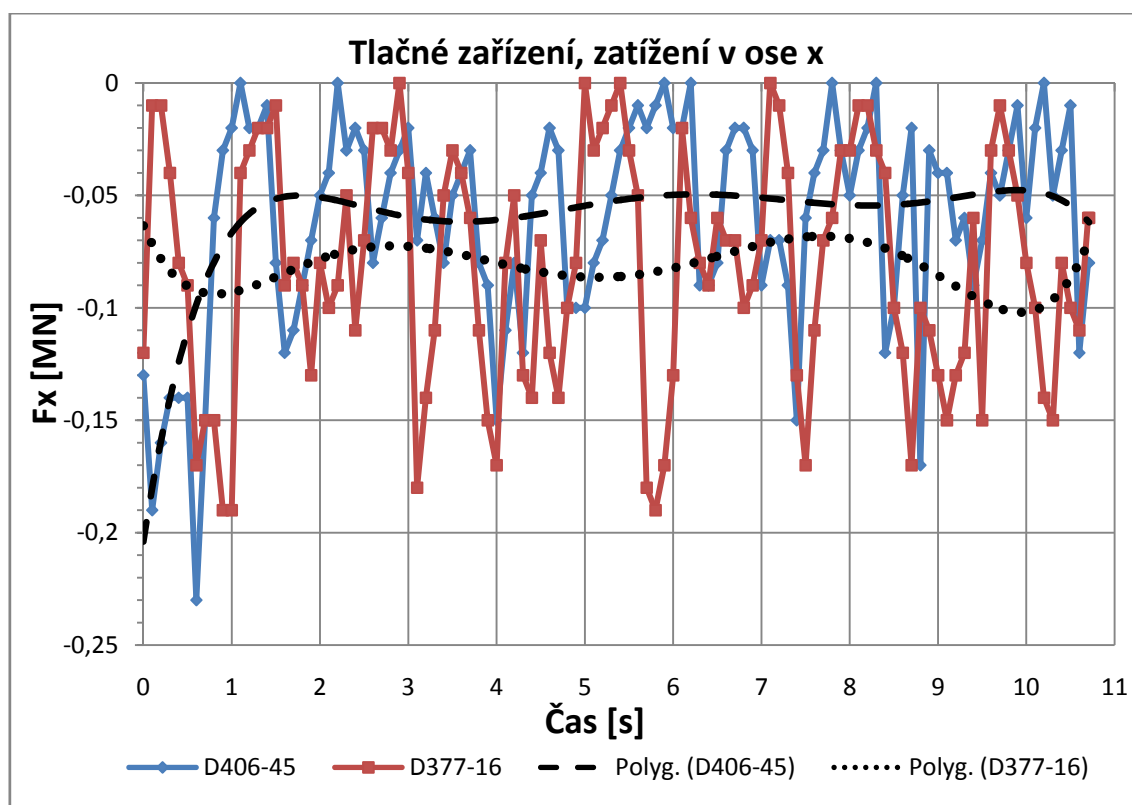


Obr. 33 Přetvárný odpor ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.

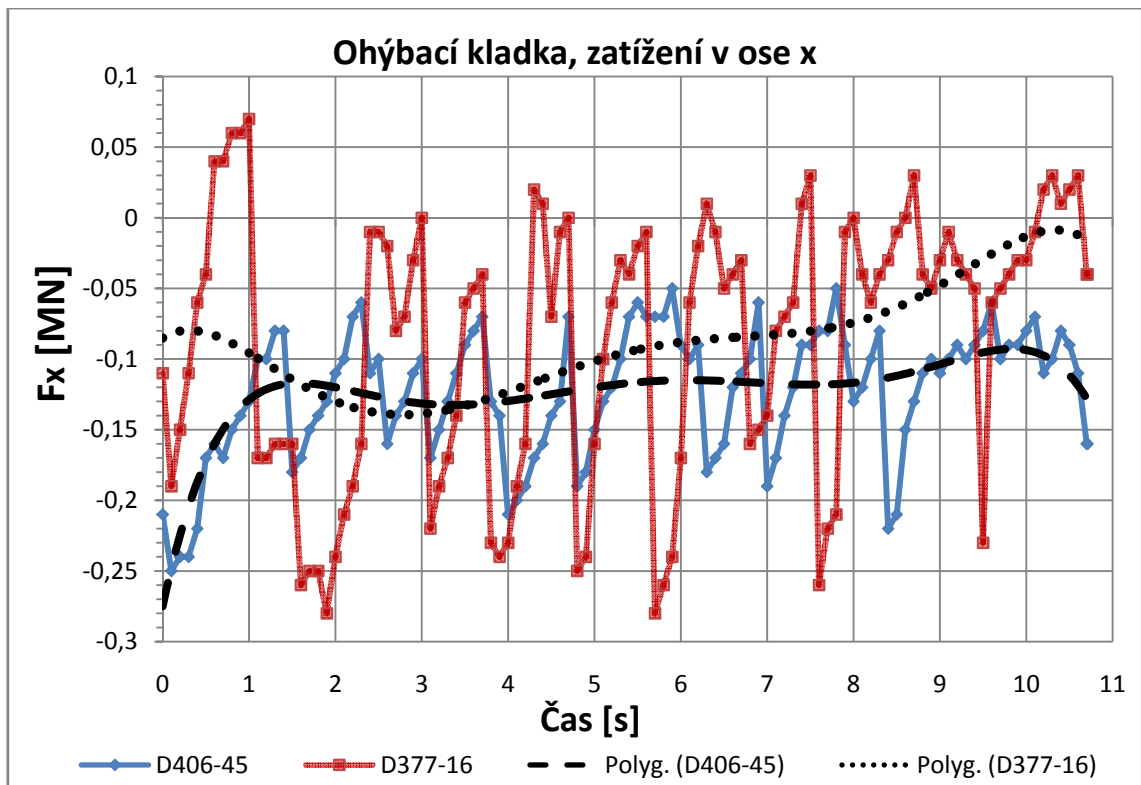


Obr. 34 Přetvárný odpor ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.

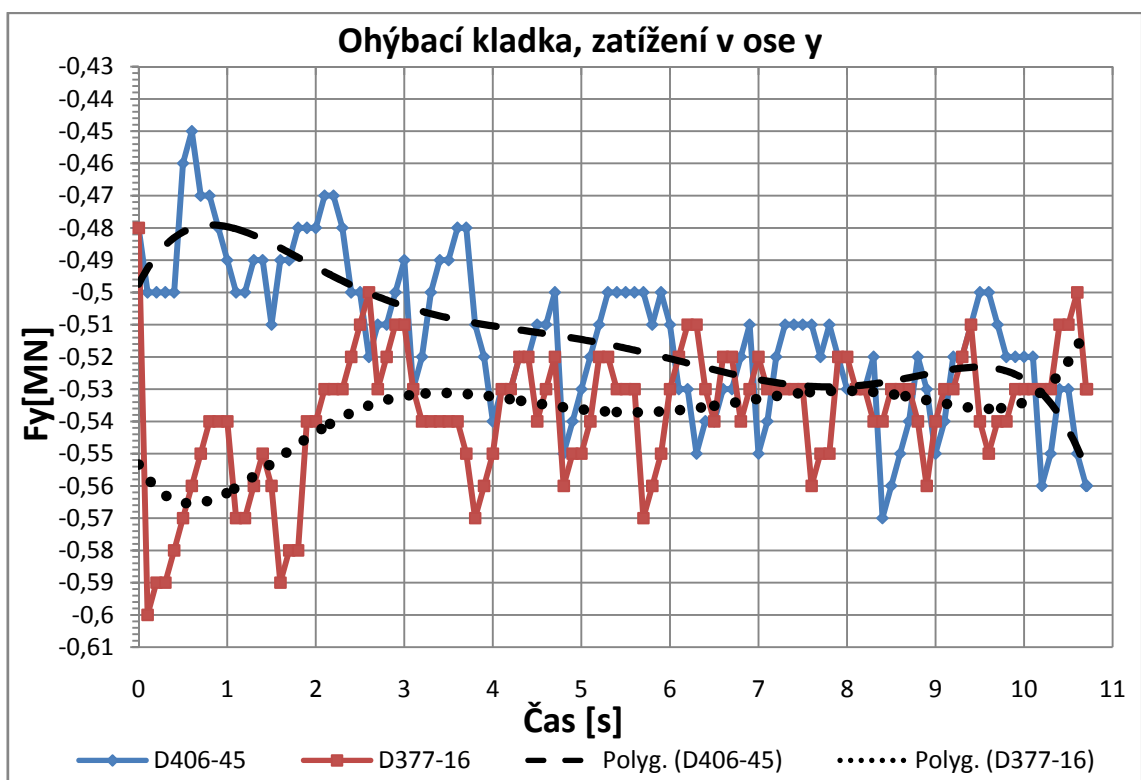
Hlavním výstupem provedené analýzy je stanovení silových reakcí na hlavní části ohýbacího stroje. Analýzou metodou MKP bylo zjištěno, že největší síly působí na vnitřní vodící kladku stroje. Směr působení silových reakcí je pro jednotlivé části stroje poněkud odlišné. Tlačné zařízení je namáháno proti směru jeho pohybu, ohýbací kladka je namáhána v ploše styku s ohýbanou trubkou směrem od středu vznikajícího oblouku ohybu. Vnitřní vodící kladka je namáhána ve stejném směru jako ohýbací kladka, ale s orientací do středu ohybu. Směr působení sil v případě kladek bude kolísat dle nerovnoměrnosti odporů odvalování a rotace během pracovního cyklu. Vnější vodící kladka je namáhána jen nepatrně silami vznikajícími při ohybu. Průběhy sil působících na jednotlivé části stroje jsou znázorněny v grafech 4 až 9.



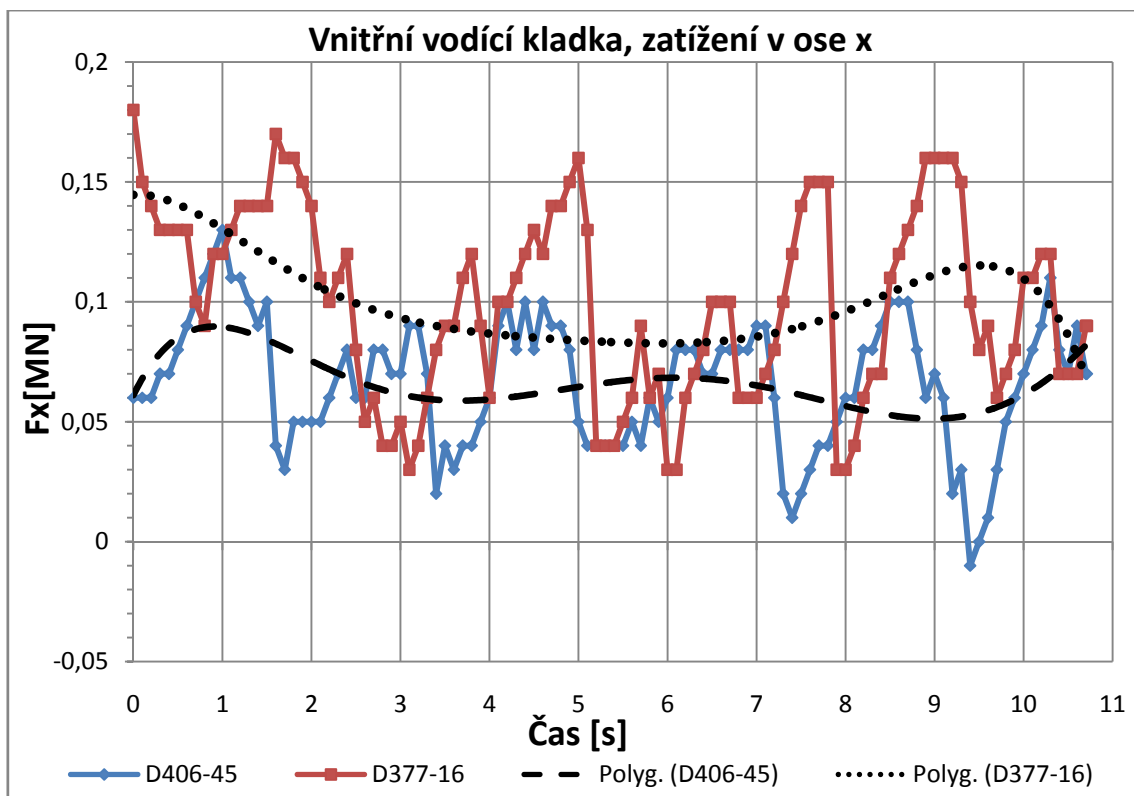
Graf č. 4 – Zatížení tlačného zařízení v ose x ohýbacího stroje.



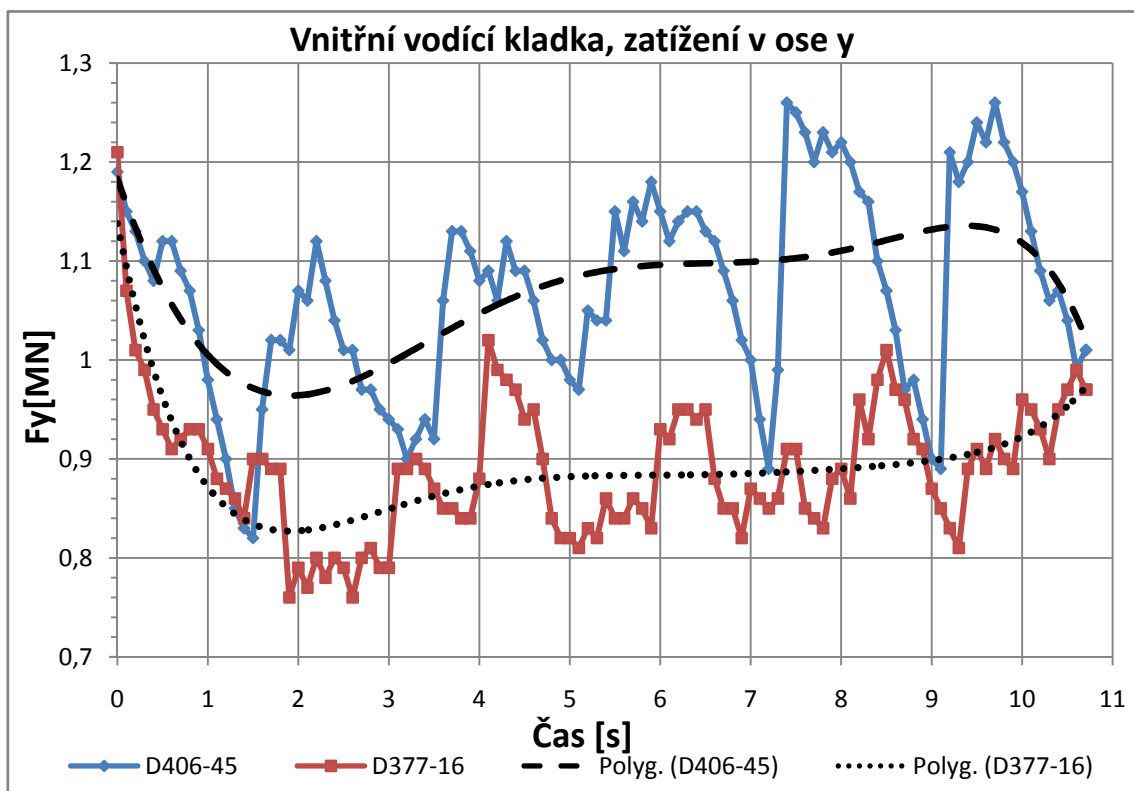
Graf č. 5 – Zatížení ohýbací kladky v ose x ohýbacího stroje.



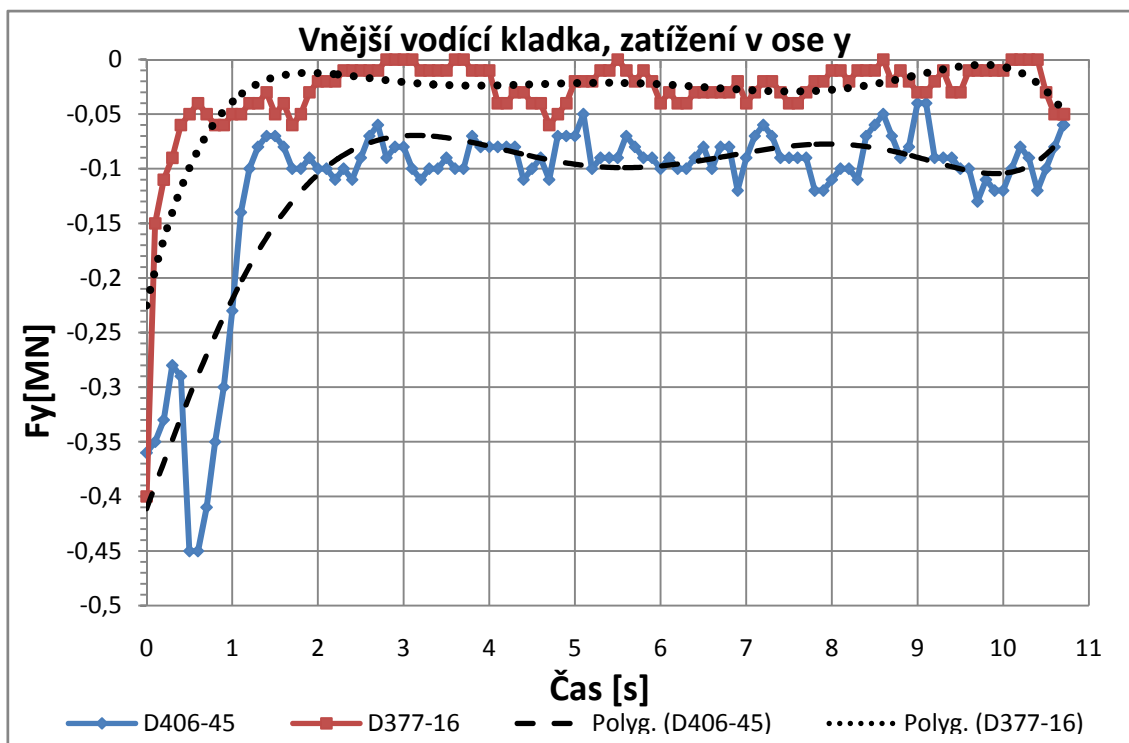
Graf č. 6 – Zatížení ohýbací kladky v ose y ohýbacího stroje.



Graf č. 7 – Zatížení vnitřní vodící kladky v ose x ohýbacího stroje.



Graf č. 8 – Zatížení vnitřní vodící kladky v ose y ohýbacího stroje.



Graf č. 9 – Zatížení vnější vodící kladky v ose y ohýbacího stroje.

- Silové parametry při zkružování

Síly působící na jednotlivé části ohýbacího stroje jsou pro oba představitele ohýbaných trubek v tabulce č. 5 a 6. Uvedené hodnoty jsou maximální hodnoty sil působící na tlačné zařízení, ohýbací kladku, vnější vodící a vnitřní vodící kladku.

Tab. 5 Silové poměry působící na jednotlivé části ohýbacího stroje

ČSN 41 2040	tlačné zařízení F [MN]	ohýbací kladka F [MN]		vnitřní vodící kladka F [MN]		vnější vodící kladka F [MN]
	Zatížení v ose X	Zatížení v ose X	Zatížení v ose Y	Zatížení v ose X	Zatížení v ose Y	Zatížení v ose Y
Ø406-45	0,23	0,25	0,57	0,13	1,26	0,45
Ø377-16	0,19	0,28	0,60	0,18	1,21	0,40

6 Diskuze dosažených výsledků

Hlavním cílem této diplomové práce bylo analyzovat parametry procesu zkružování trubek velkých rozměrů pro reprezentanty polotovaru tenkostěnné trubky Ø377-16 a trubky tlustostěnné Ø406-45 z materiálu oceli dle ČSN 41 2040. První část diplomové práce je věnována rozboru používaných technologií při ohýbání trubek a hlavním dějům probíhajících při ohybu trubek. Následně je proveden analytický popis parametrů při procesu ohýbání trubek a popis simulačního programu pro tepelně mechanické zpracování systému QForm, ve kterém je následně analýza procesu provedena. Návrh geometrických modelů obou analyzovaných trubek určených k ohybu zkružováním byl proveden v programu Pro/Engineer. Analýza procesu zkružování probíhala v prostředí programu QFORM verze 4.3.2. Tento program je založen na propočítaných algoritmech metody MKP, které byly ověřeny praxí a mezinárodními zkouškami. Analytické práce umožnily s poměrně vysokou přesností stanovit síly působící na jednotlivé části soustavy kladkového ohýbacího stroje. Ohýbací zařízení je koncipováno jako tlačné s ohýbací kladkou. Trubka je tlačena soustavou vodících kladek přes indukční ohřívací zařízení proti ohýbací kladce. Analýzou metodou MKP bylo zjištěno, že největší síly působí na vnitřní vodící kladku stroje. Směr působení silových reakcí je pro jednotlivé části stroje poněkud odlišné. Tlačné zařízení je namáháno proti směru jeho pohybu, ohýbací kladka je namáhána v ploše styku s ohýbanou trubkou směrem od středu vznikajícího oblouku ohybu. Vnitřní vodící kladka je namáhána ve stejném směru jako ohýbací kladka, ale s orientací do středu ohybu. Maximální hodnoty sil působící na jednotlivé části stroje představují u tlačného zařízení 0,23/0,19 [MN], u ohýbací kladky 0,57/0,60 [MN], u vnitřní vodící kladky 1,26/1,21 [MN] a u vnější vodící kladky 0,45/0,40 [MN] pro analyzované reprezentanty Ø406-45/Ø377-16. Tvorba oblouku poloměru ohybu se při analýzách jevila v obou analyzovaných případech rovnoměrná. Problematika odpružení však bude vzhledem ke složitým

termomechanickým procesům odlišná od běžného zkružování. Ani výsledky získané na základě analýzy metodou MKP nelze bez korekcí použít, neboť i zde je materiál idealizovaný. Proto nastavení přesného oblouku ohybu je možno provádět jen na základě provozních zkoušek.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VÍTEK, A. – *Ohýbání trubek*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. 159 s.
- [2] ČABELKA J. a kol, *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. 160 s.
- [3] JINPO - *Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem SOT 530*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <<http://www.jinpo-plus.cz/>>
- [4] HRUBÝ J. *Silové poměry při ohýbání trubek v kladkové ohýbačce*. Ostrava: Inženýrský servis, 2006. 10 s.
- [5] HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilových parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. 73 s.
- [6] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
- [7] HRUBÝ, J. – *Technologičnost konstrukce při výběru materiálu*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Tek/Tek02.pdf>>
- [8] FÜRBACHER, I. – *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity*. Praha: Dashöfer, 2002. 1 sv. (v různém stránkování). ISBN: 80-86229-02-5.
- [9] STANGE R., *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, inc., 1963
- [10] SEMIATIN S. L. a kol. *Metals handbook ninth edition, Vol. 14 Forming and Forging*. Ohio: Metals Park: ASM International, 1998

- [11] HRUBÝ, J. – *Strojírenské tváření: základy teorie tváření*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/08Pretvar%20Odpor.pdf>>
- [12] LEINVEBER, J. – ŘASA, J. – VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Praha: SCIENTIA, 1999. 985 s. ISBN: 80-7183-164-6.
- [13] HRUBÝ, J. – *Metoda konečných prvků: panel 1*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>
- [14] HRUBÝ, J. – *Metoda konečných prvků: panel 2*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel2.pdf>
- [15] HRUBÝ, J. – *Metoda konečných prvků: panel 3*. [online]. [cit. 2009-24-04]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel3.pdf>
- [16] PETRUŽELKA, J., HRUBÝ, J. *Výpočetní metody ve tváření - metoda konečných prvků*. [učební texty], Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1997.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Ohýbání pouhým momentem.
- Obr. 2 Ohyb příčnou silou.
- Obr. 3 a) Ohýbání na trnu navíjením na segment.; b) Ohýbání bez trnu navíjením na segment.
- Obr. 4 Ohýbání zakružováním.
- Obr. 5 Ohýbání vytlačováním.
- Obr. 6 Ohýbání vytlačováním.
- Obr. 7 Záhybový ohyb.
- Obr. 8 Zploštělý tvar příčného řezu trubky.
- Obr. 9 Vydutý tvar příčného řezu trubky.
- Obr. 10 Řez ohnutou trubkou.
- Obr. 11 Rozložení napětí při elastické deformaci v ohýbané trubce.
- Obr. 12 Rozložení napětí v plasticky deformované trubce při ohýbání.
- Obr. 13 Zbytkové napětí v trubce ohýbané zastudena po ohybu po zpětném odpružení.
- Obr. 14 Rozklad sil v místě ohybu.
- Obr. 15 Rozsah tvářecích teplot pro uhlíkové oceli.
- Obr. 16 Indukční ohřev, ochlazení úzkého pruhu trubky.
- Obr. 17 Průběh ohýbání při středofrekvenčním ohybu.
- Obr. 18 Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem SOT 530.
- Obr. 19 Stroj pro ohýbání trubek SOT 325.
- Obr. 20 Měřicí zařízení ke kontrole úhlů a poloměrů ohybů.
- Obr. 21 Průběh sil při ohybu trubky se středofrekvenčním ohřevem.
- Obr. 22 Součinitel tvaru pro trubky.
- Obr. 23 Minimální poloměry ohybu při středofrekvenčním ohybu.
- Obr. 24 Schéma ohýbacího stroje.
- Obr. 25 Schéma sestavy geometrického modelu procesu zkružování.
- Obr. 26 Schéma sestavy geometrického modelu procesu zkružování před započítáním simulace.
- Obr. 27 Specifikace nástrojů a polotovaru v procesu simulace.
- Obr. 28 Nahrazení induktoru ohřívacími vodícími kladkami.

Obr. 29 Efektivní deformace ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.

Obr. 30 Efektivní deformace ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.

Obr. 31 Střední napětí ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.

Obr. 32 Střední napětí ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.

Obr. 33 Přetvárný odpor ohýbané trubky Ø377–16 z oceli 12 040.

Obr. 34 Přetvárný odpor ohýbané trubky Ø406–45 z oceli 12 040.

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Materiálové konstanty A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 , n a k pro materiál ocel ČSN 41 2040.

Tab. 2 Chemické složení materiálu ČSN 41 2040 [hm. %].

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu ČSN 41 2040.

Tab. 4 Porovnání oceli ČSN 41 2040 se zahraničními ekvivalenty.

Tab. 5 Silové poměry působící na jednotlivé části ohýbacího stroje.

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 – Přetvárný odpor oceli ČSN 41 2040.

Graf č. 2 – Teplotně závislé parametry oceli ČSN 41 2040.

Graf č. 3 – Modul pružnosti v tahu oceli ČSN 41 2040.

Graf č. 4 – Zatížení tlačného zařízení v ose x ohýbacího stroje.

Graf č. 5 – Zatížení ohýbací kladky v ose x ohýbacího stroje.

Graf č. 6 – Zatížení ohýbací kladky v ose y ohýbacího stroje.

Graf č. 7 – Zatížení vnitřní vodící kladky v ose x ohýbacího stroje.

Graf č. 8 – Zatížení vnitřní vodící kladky v ose y ohýbacího stroje.

Graf č. 9 – Zatížení vnitřní vodící kladky v ose y ohýbacího stroje.

Děkuji prof. Ing. Jiřímu Hrubému, Csc.
za metodické vedení v průběhu zpracování celé
diplomové práce a za poskytnutí cenných rad
k dané problematice.

V Olomouci 28. dubna 2009.